

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

***SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ
BEZOLOVNATÝCH PÁJENÝCH SPOJŮ***

Disertační práce

Ing. Martin Plaček

Praha, červenec, 2019

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika (P2612)

Studijní obor: Elektrotechnologie a materiály (2602V009)

Školitel: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Školitel specialista: Ing. David Bušek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a v předložené práci důsledně citoval použitou literaturu.

V Praze, 12. 7. 2019

Martin Plaček

.....



Poděkování

Děkuji touto cestou všem, kteří jakkoli přispěli k realizaci této disertační práce; především mému vedoucímu práce doc. Ing. Karlu Duškovi Ph.D. za jeho čas, vstřícnost, obětavost a pomoc při realizaci experimentů. Nemalé poděkování bych rád směřoval ke své rodině, jejíž podpora a trpělivost významným dílem také přispěla k realizaci.



Anotace

V průběhu procesu pájení elektrických součástek k desce plošných spojů dochází ke vzniku velkého množství specifických událostí, které v počáteční fázi výroby či v průběhu života zařízení způsobují chyby funkce. S rozvojem bezolovnatých pájek a s rostoucí miniaturizací narůstá vliv tepelného chování pájeného spoje. Bezprostřední okolí pájecí slitiny na DPS je ovlivňováno uvolňováním latentním teplem v průběhu chladnutí pájky. Práce se zabývá tepelným chováním bezolovnatých pájecích slitin (SAC 305, SAC 387, Sn-Ag, Sn-Bi) a komparační olovnatou pájecí slitinou Sn63Pb37. Všechny testované slitiny v průběhu změny skupenství (z kapalného do pevného) uvolňují větší či menší množství tepla, které se šíří především vedením po vodivých cestách a součástkách k nejbližším sousedním bodům a v kombinaci s dalším uvolněným teplem napomáhá ke vzniku vad při pájení, především tzv. efektu náhrobního kamene (tombstoning). Vznik tombstoningu může být dále podpořen změnou povrchového napětí, které se mění působením pájecí kapaliny při pájení v parách. Vliv pájecí kapaliny na změnu povrchového napětí je v práci diskutován a ověřen metodou smáčecích vah.

Klíčová slova

latentní teplo, bezolovnatá pájecí slitina, chyby při pájení, tombstoning, povrchové napětí, smáčecí síla, pájecí kapalina



Annotation

There are a large number of specific events that cause error of function during the process of soldering electrical components to a printed circuit board. These errors occur at the initial stage of production or during the life of the device. The influence of the thermal behaviour of the soldered joint increases with the development of lead-free solders and with increasing miniaturization. The very near surroundings of the solder alloy on the PCB is affected by latent heat release during solder cooling. This work deals with thermal behaviour of lead-free solder alloys (SAC 305, SAC 387, Sn-Ag, Sn-Bi) and comparative lead solder alloy Sn63Pb37. All tested alloys release more or less heat from themselves during phase change (from liquid to solid). The heat is spread mainly through conduction paths and electrical components to the nearest neighbouring soldered joints. This heat, combined with another heat released helps to create defects in soldering, particularly the so-called Tombstone effect. The formation of Tombstone effect can be further supported by altering the surface tension, which is changed by the action of the soldering liquid at soldering in vapours. The influence of soldering liquid on the change of surface tension is discussed in this work and verified by the method of wetting weights.

Keywords

Latent heat, lead-free solder alloy, errors during soldering, tombstoning, surface tension, wetting force, soldering liquid



OBSAH

1. CÍL DISERTACE	9
2. ÚVOD	10
3. TEORETICKÉ POJEDNÁNÍ	12
3.1 Pájecí slitiny	12
3.1.1 Olovnatá pájecí slitina	13
3.2 Bezolovnaté pájecí slitiny	16
3.2.1 Pájecí slitina cín-měď	16
3.2.2 Pájecí slitina cín-stříbro	18
3.2.3 Skupina pájecích slitin - SAC	19
3.2.3.1 Pájecí slitina SAC 305	20
3.2.3.2 Pájecí slitiny SAC387 a SAC405	21
3.2.4 Pájecí slitina SnBi	22
3.3 Rovnovážný diagram	23
3.4 Latentní teplo	24
3.5 Šíření tepla	28
3.5.1 Šíření tepla prouděním	29
3.5.2 Šíření tepla sáláním	29
3.5.3 Šíření tepla vedením	30
3.6 Intermetalické vrstvy	31
3.6.1 Vznik a vlastnosti intermetalické sloučeniny	32
3.7 Heating factor	35
3.8 Měření latentního tepla	37
3.8.1 Termočlánek	37
3.8.2 Diferenční skenovací kalorimetrie	39
3.9 Tombstone efekt	42
3.10 Smáčivost slitiny a smáčecí síla	43
3.10.1 Meniskograf	45
3.11 Pájení v parách	47
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	49
4.1 Latentní teplo	49



4.1.1	Osamocený pájený spoj – průběh latentního tepla	49
4.1.1.1	Konstrukce měřicí soustavy	49
4.1.1.2	Průběh měření - teplotní profily	52
4.1.2	Dva samostatné body na desce – průběh latentního tepla	53
4.1.3	Rozložení teplot uvnitř pájeného spoje.....	56
4.1.3.1	Technické provedení měřicího přípravku	56
4.1.3.2	Vlastní měření průběhů teplot.....	59
4.1.4	Dva body na desce propojené vodivou cestou – průběh latentního tepla.....	69
4.1.5	Šíření latentního tepla přes součástku mezi pájecími body	73
4.1.5.1	Teoretická a technická část experimentu	73
4.1.5.2	Naměřené výsledky DSC analýzy.....	75
4.2	Nárůst tombstoningu při procesu pájení v parách.....	79
4.2.1	Teoretická a technická část experimentu	80
4.2.2	Naměřené výsledky experimentu	84
5.	SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH POZNATKŮ	88
6.	SEZNAM POUŽITÝCH MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ	91
7.	LITERATURA	92
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
9.	SEZNAM TABULEK	101
10.	SEZNAM ZKRATEK	102
11.	SEZNAM PUBLIKACÍ DISERTANTA	104



1. CÍL DISERTACE

Práce má směřovat k lepšímu pochopení tepelného chování bezolovnatých pájecích slitin a porovnat je s ověřenou kombinací pájek na bázi cín-olovo. Blíže se soustředí na změnu charakteru teplotního průběhu pájecí slitiny při skupenské změně (z pevného skupenství do kapalného a obráceně). Zjištěné výsledky budou aplikovány na pájený spoj a jeho vliv na ostatní okolní pájené spoje, a elektrické součástky umístěné v jeho blízkosti. Naměřené výsledky by měly ověřit, zda termické jevy spojené s fázovou změnou pájecí slitiny mají vliv na výskyt chyb při procesu pájení.



2. ÚVOD

Materiál, nebo lépe a výstižněji hmota, je součástí všeho a tvoří také vše kolem nás i nás samotné. Člověk se v rámci svého konání neustále snaží prohlubovat znalosti o jejích vlastnostech, přizpůsobovat a kombinovat je k obrazu svých potřeb. Elektrotechnika se stala jedním z oborů, kde vlastnosti materiálů hrají velmi významnou roli. Jejich studium, poznání a vývoj přináší nejen pokrok v tomto oboru, ale stává se motorem i v ostatních odvětví průmyslu. Samotná elektrotechnika využívá široké spektrum nejrůznějších typů materiálů, jak nepřebornou škálu kovů, tak i polymerů, látky s polovodivými vlastnostmi a stovky či tisíce dalších.

Každé elektrické zařízení, s nímž se můžeme setkat, je složeno z jednotlivých elektrických obvodů obsahujících elektrické zdroje, lineární a nelineární prvky a spoje těchto prvků. A právě tyto spoje jsou jedním z klíčových bodů, které zasluhují naši pozornost. Na spoje jsou kladeny velké nároky a mnohdy se stávají výrazným zdrojem poruch uvnitř elektrických zařízení. Především se hledí na mechanickou odolnost, elektrické vlastnosti a odolnost vůči klimatickým vlivům.

Spoje vodivých cest, kontaktování součástek na desky plošných spojů a jiné spoje v obvodech byly převážně, krom dalších méně častých metod, realizovány olovnatými pájkami. Cín olovnatá slitina ve správném poměru se stala nejběžněji používanou a léty prověřenou měkkou pájkou v elektrotechnice. I v dnešní době jsou místa a aplikace, kde je pájecí slitina na bázi cín-olovo díky svým vlastnostem nenahraditelným prvkem výroby.

Olovnatá složka je podle legislativy Evropské unie (legislativa vymezuje povolené množství zakázané látky nebo její úplné vyloučení z výrobního procesu) zařazena spolu s dalšími chemikáliemi do seznamu nebezpečných látek pro životní prostředí a je postupně stahována z výroby. Díky absenci olova se v relativně krátké době začaly objevovat náhrady s cílem dosáhnout podobných či totožných vlastností. Na obzoru se objevily dvě základní vhodné a možné alternativy, jimiž se začal ubírat směr vývoje a výzkumu v oblasti pájecích slitin.

První ekologicky únosnější alternativou za olovnaté pájky, které zasluhují naši pozornost, jsou elektricky vodivá lepidla na bázi kompozice polymerů a vodivých kovů. Jejich princip pro vytvoření elektricky vodivého spoje je založen na zcela odlišné bázi než



spoj vytvořený prostřednictvím pájky. Hlavní nevýhodou, která omezuje elektricky vodivá lepidlav použití u mnoha aplikací, je malá odolnost proti navlhání a horší mechanické vlastnosti. Avšak na druhé straně jejich hlavní výhodou je jejich nízká teplota při vytvrzování a nižší spotřeba použitých drahých kovů pro vytvoření vlastního vodivého spoje.

Další alternativou za olovnaté pájecí slitiny se staly bezolovnaté pájky, které by se měly svými elektrickými a mechanickými vlastnostmi blížit těm olovnatým. Převážná většina bezolovnatých slitin je však ekonomicky nákladnější než klasická SnPb pájka. Pro tuto skupinu je v převážné většině nutná přítomnost minimálně 60 % zastoupení složky Sn a zbytek je doplňován v především drahými ušlechtilými kovy, jejichž cena se odvíjí od dostupnosti suroviny, která je závislá na velikosti celosvětových zásob.

Na trh jsou stále uváděny nové řady bezolovnatých pájecích slitin, avšak jejich způsob použití není stále zcela shodný s SnPb skupinou. Jedním z výrazných rozdílů je například bod tání pájecí slitiny, který je obvykle vyšší než u olovnaté slitiny a tím se zvyšují nároky na technologické postupy při výrobě desek plošných spojů. Nemalé rozdíly lze nalézt u mechanických vlastností a s tím související úroveň spolehlivosti, jejíž změna také není zanedbatelná. Nové slitiny s sebou přinášejí i ne zcela jasný průběh chování při tepelných procesech pájení, a to díky své složitosti systému. Avšak faktorů, které ovlivňují či mohou ovlivnit výsledné vlastnosti pájecích slitin a tedy i pájené (elektricky vodivé) spoje je mnoho a s příchodem stále nových a složitějších systémů toto množství narůstá. Niance z hlediska technologických postupů, zpracování a aplikace vznikají už jen odlišným krystalickým uspořádáním nebo množstvím složek ve slitinách. Proto je nutné hlubší zkoumání pájených spojů, aby se předešlo všem předpokládaným rizikům, která by mohla nastat při jejich užití v praxi.



3. TEORETICKÉ POJEDNÁNÍ

3.1 Pájecí slitiny

Pájení, tento výraz byl použit pro velmi důmyslný způsob spojování dvou kovových částí přidaným kovem. Samotné spojení dvou kovových částí (komponentů) se děje roztavením přidaného materiálu, který je velmi zřídka složen jen z jednoho jediného prvku, častěji se jedná o kompozici – slitinu dvou a více kovů. Aby toto platilo, spojované kovové části či slitiny musí mít v první řadě teplotu tání vyšší, než je kov přidávaný a zároveň musí být tímto kovem smáčitelné.

Samotná pájecí slitina se ohřeje na teplotu vyšší, než je její teplota tání, dojde tak nejen k jejímu roztavení, ale i snížení viskozity. Ke spojení s kovovým substrátem dojde po jeho zahřátí na teplotu vyšší, než je teplota tání pájecí slitiny. Při dosažení tížených parametrů začnou molekuly roztavené pájky difundovat do nerovného povrchu pájeného materiálu. Po snížení teploty všech zúčastněných částí proces pájka tuhne a pojí komponenty v jeden celek.

Ve své podstatě jde o jednoduchý, rychlý a jednoznačně provedený způsob spojení dvou či více kovových součástí. Takto vytvořený spoj disponuje velmi vysokou pevností a mechanickou odolností; z pohledu elektrotechnického se stává velmi dobrým mostem či spojnicí pro převod elektrického signálu z jedné komponenty na druhou.

Široká škála pájecích slitin se dá dělit do mnoha skupin – například z hlediska teploty, nebo složení. Pro elektrotechniku můžeme toto spektrum trochu zúžit a zaměřit se jen na určitou oblast, která je pro hromadnou výrobu nejčastěji používána. Teplotně se dostáváme do oblasti kolem 140 °C – 240 °C tedy do oblasti, která je mnohem níže, než je teplotní hranice pro měkké a tvrdé pájení (450 °C). Primárně se v dnešní době ve slitinách pro elektrotechniku používá především cín (Sn) v kombinaci s ušlechtilými a vzácnými kovy jako je například: stříbro (Ag), měď (Cu), bismut (Bi), zinek (Zn), nikl (Ni), ale také indium (In) a zlato (Au). Zatímco v minulosti se primárně používala pájecí slitina na bázi cín/olovo, která dnes je z ekologických důvodů nahrazována.



3.1.1 Olovnatá pájecí slitina

Slitina olova a cínu se pro pájení v elektrotechnice a nejen v ní (pro některé zvláštní účely se přidávají ještě další složky) používá více jak sto let. V různých poměrech obou složek našla velmi široké uplatnění. Na základě zkušeností byly její vlastnosti v průběhu času zdokonaleny, a to pro výrobní procesy jak kusové tak hromadné výroby. Za dobu svého používání se stala ověřeným a spolehlivým prvkem v elektrotechnické výrobě. Výrobci se proto snaží parametry slitin nastupující na její místo upravit tak, aby se jí blížily. V krátkém popisu přiblížím její vlastnosti.

Cín-olovnatá pájka, jejímž nejznámějším zástupcem je 63Sn37Pb, se za desítky let užívání v elektrotechnice stala nenahraditelným materiálem pro elektrotechnickou výrobu. Binární fázový diagram slitiny olova a cínu byl studován již před více jak sto lety a především se využívá eutektického bodu (63% cínu a 37% olova) diagramu. Dalšími možnými poměry pak vznikají podeutektické a nadeutektické slitiny (jsou jimi například: Sn60Pb40, Sn40Pb60, Sn35Pb65, Sn50Pb50, apod.).

Pokud vezmeme každý zmíněný prvek zvlášť, jsou jeho základní parametry odlišné od konečné slitiny. Výrazné změny lze zaznamenat například u teploty tání.

Samotné olovo (Pb) s atomovým číslem 82 patří mezi těžké kovy. Má krystalickou mřížku fcc, tedy kubickou mřížku plošně centrovanou; tepelná vodivost olova je $35,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Bod tání čistého olova je $327,46 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cín (Sn) má atomové číslo 50. Za běžné pokojové teploty se vyskytuje ve formě stabilní bílé modifikace krystalitů označované jako β -Sn v tetragonální krystalické struktuře (čtverečná soustava) s tepelnou vodivostí $66,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Bod tání čistého cínu je $231,93 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vhodnou volbou poměrů obou složek lze teplotu tání i tuhnutí upravit. Cílem je teplotu snížit. Pokud se však podíváme na tání a tuhnutí slitiny detailněji, nejde o zcela jednoduchý proces.

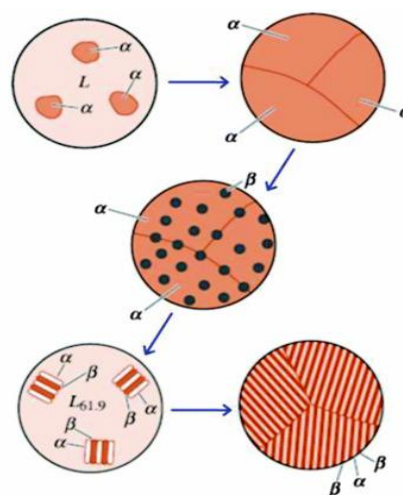
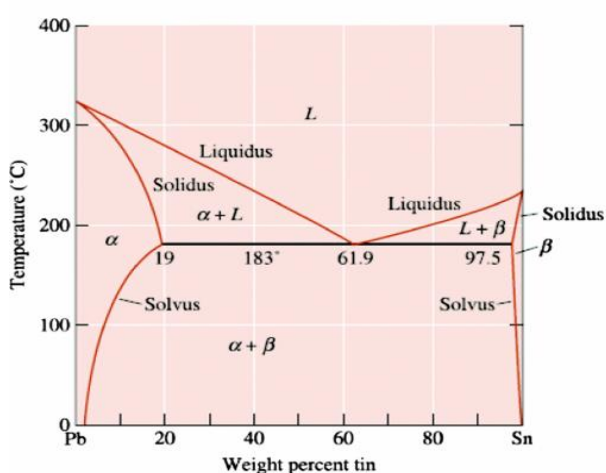
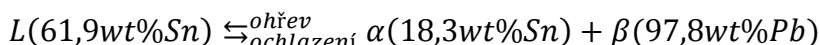
Již zmíněné eutektikum je tuhá směs dvou látek, jejíž krystaly se vytvořily při vzájemném tuhnutí směsi. Čisté eutektikum vzniká v takovém poměru obou látek, při kterém je teplota tuhnutí směsi nejnižší (61,9 % hmotnostních cínu ve slitině).

Z fáze likvidu (L), kdy má slitina teplotu nad bodem tavení a vytváří homogenní směs, přestupuje přes bod eutektické teploty do fáze solidu; pevné fáze, kde krystalizuje a která je



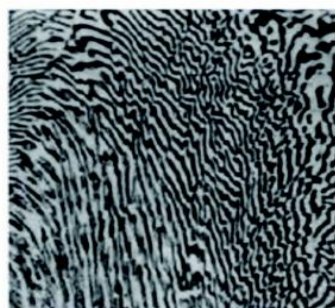
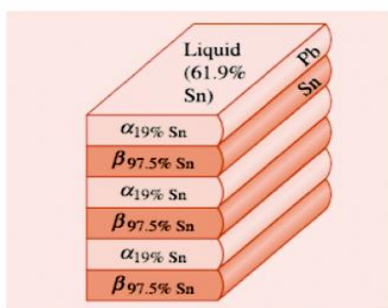
tvořen primárními krystaly tuhých roztoků α a β . Vzniklý tuhý roztok je na rozhraní likvidu a solidu nasycený složkou B (cín). [1],[2]

S poklesem teploty pod eutektickou izotermu se likvid stává přesycený touto složkou, a proto po vzniku tuhého roztoku označeného α (uspořádání krystalové mřížky) se z něj začnou vytěšňovat přebytečné atomy složky B. Složka B však nemůže v dané soustavě existovat jako čistá látka v pevné fázi. Vytváří se proto tuhý roztok β (odlišné uspořádání krystalické mřížky od α). Tuhý roztok α vzniká do doby, než dojde k rovnovážnému stavu s ohledem na koncentraci obou složek a teploty slitiny. [2]



(a)

(b)



(c)

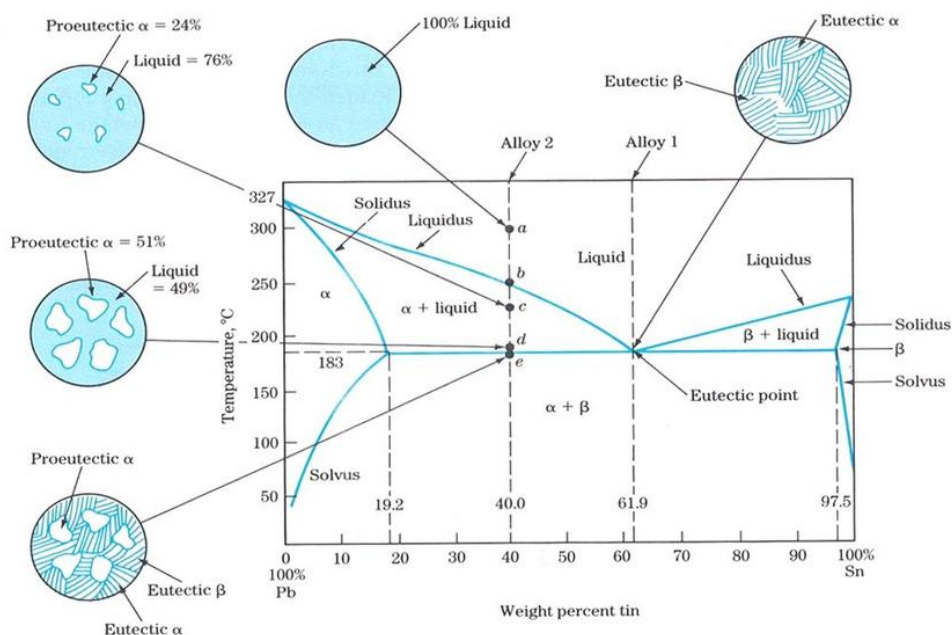
(d)

Obr. 1: (a) fázový diagram eutektické slitiny cínu a olova. Poměr cínu a olova 61,9: 38,1 vykazuje svou charakteristikou velmi nízký bod tání (183 ° C) na rozdíl od základních složek (cín = 232 ° C, olovo = 327 ° C); (b) ukázka tuhnutí a vzniku pevného roztoku cín-olovnaté eutektické slitiny; (c) deskové uspořádání složek α a složek β cín-olovnaté slitiny. Atomy olova z tekuté fáze primárně difundují do desky α a atomy cínu do složky β ; (d) fotografie struktury cín-olovnatého eutektika. [3]

Pohybuje-li se složení slitiny pod eutektickým bodem nebo nad eutektickým bodem, dochází při tuhnutí pájky k mezifázi, při níž v tavenině vznikají zárodky krystalů tuhého roztoku α (podeutektická slitina) nebo tuhého roztoku β (nadeutektická slitina – po nasycení

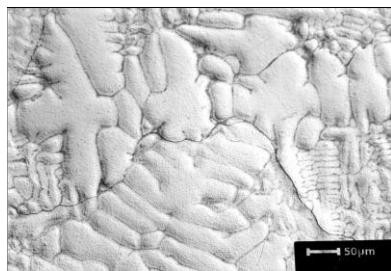


je z tuhého roztoku β vylučován tuhý roztok α), které s poklesem teploty narůstají až do stavu rozhraní mezi likvidem a solidem (rovnovážný stav dvou fází $\alpha+\beta$). [2]

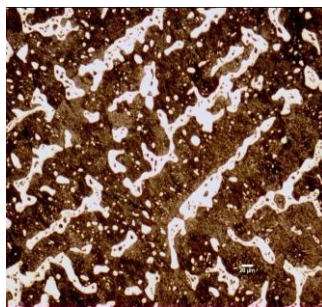


Obr. 2: Fázový diagram cín-olovnaté slitiny. Ukázka změny krystalické struktury při tuhnutí mimo eutektický bod – 40% obsahu složky Sn. [3]

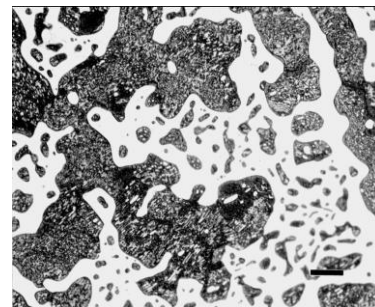
Vzájemná rozpustnost obou složek slitiny se výrazně mění s teplotou. Je-li vytvořen nasycený roztok první složky s druhou při teplotě tání, s klesající teplotou rozpustnost klesá a druhá složka je vylučována. Při teplotě 50 °C je možné rozpustit v čistém olovu 2 % cínu; zvýšíme-li teplotu na hodnotu eutektika 183 °C, dojde k maximální možné rozpustnosti cínu v olovu (α -Pb) na 19 %. Naopak při pokojové teplotě nedochází téměř k žádné rozpustnosti olova v cínu. Vystoupí-li tato teplota na teplotu eutektickou, dospěje rozpustnost olova v cínu (β -Sn) na 2,5 %. Vznik eutektika ($L \leftrightarrow \alpha\text{-Pb} + \beta\text{-Sn}$) nastává při obsahu cínu 61,9 % a teplotě slitiny 183,6 °C. Tvar eutektické Pb složky se s obsahem cínu výrazně mění od oblých tvarů po ostré krystalické rysy. Tuto změnu stručně popisují následující obrázky. [2]



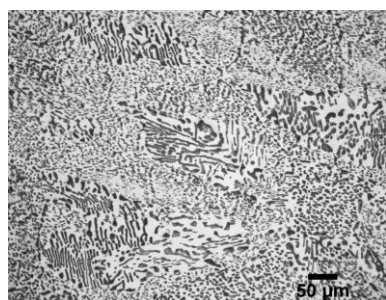
Dendritické α -Pb



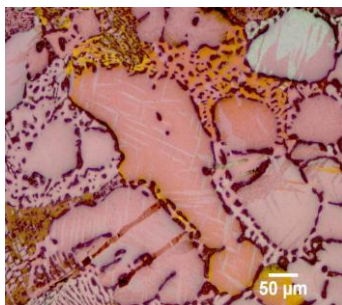
Pb – 20% Sn; α -Pb dendrity (světlá), β -Sn eutektická (tmavá)



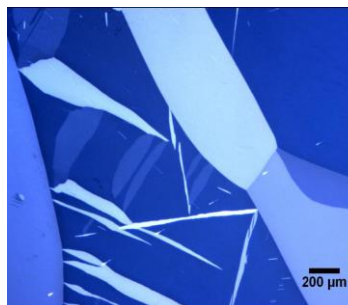
Pb – 40% Sn; α -Pb dendrity (světlá), α -Pb/ β -Sn eutektická



Pb – 61,9% Sn; pomalé chladnutí,
 α -Pb/ β -Sn eutektická



Pb – 80% Sn



Čistý cín; polarizované světlo,
 spojená β -Sn (tetragonální) zrna

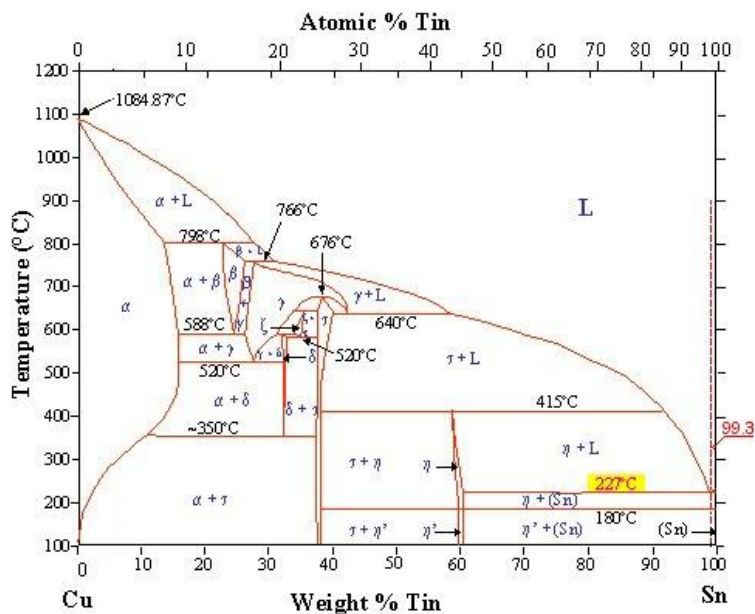
Obr. 3: Zachycení změny mikrostruktury cín-olovnaté slitiny s postupným nárůstem obsahu cínu. [5]

3.2 Bezolovnaté pájecí slitiny

V relativně krátkém časovém horizontu výrazně narostla škála bezolovnatých pájecích slitin. Snahou bylo vyvinout alternativu bez obsahu olovnaté složky za klasické a průmyslem velmi používané olovnaté slitiny. U mnohých slitin základ z původní slitiny zůstal, a to cín. Místo olova našly ve slitině uplatnění některé ušlechtilé kovy, jakými jsou například stříbro, měď, zinek, indium, bismut aj., kterých se při výrobě hojně využívá. S mnohem nižším zastoupením se zde také například vyskytuje: nikl, germanium, antimon, chrom aj. Vzhledem k relativně velmi krátkému životu na poli průmyslové výroby nejsou proto zcela známy veškeré jejich vlastnosti a chování. Dochází tedy v této oblasti k neustálému vývoji a výzkumu. Vzhledem k široké oblasti bezolovnatých slitin si přibližme jen ty, které by měly vzbudit naši pozornost a ty, na kterých se dají provést ukázky některých vybraných vlastností popsaných níže.

3.2.1 Pájecí slitina cín-měď

Nejvýraznějším zástupcem této skupiny je bezesporu 99,3Sn 0,7Cu. Obsažená měď (Cu) s atomovým číslem 29 patří mezi ušlechtilé kovové prvky. Má krystalickou mřížku fcc - krychlová mřížka plošně centrovaná. Její bod tání v čistém stavu je 1084,62 °C. [6]



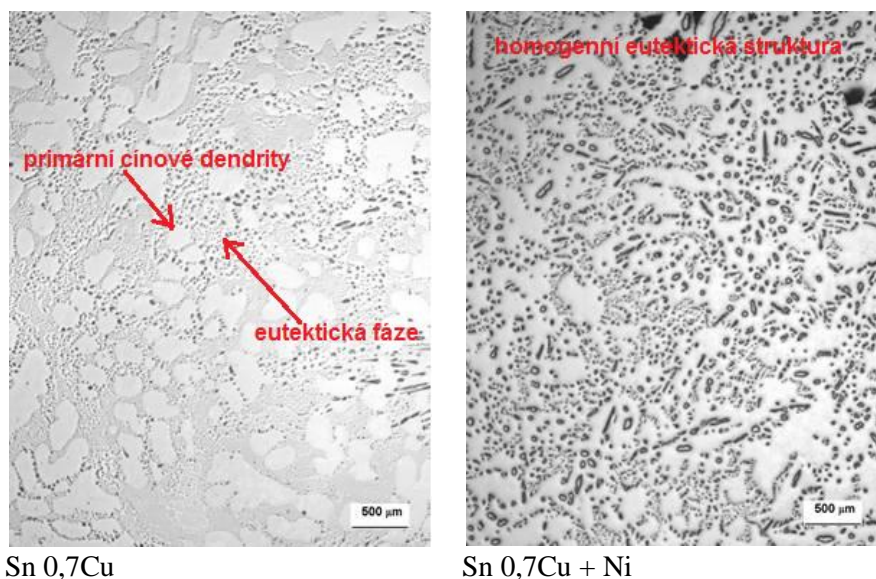
Obr. 4: Fázový diagram cínu (Sn) s mědí (Cu). [7]

Slitina byla vyvinuta a doporučena jako náhrada za Sn-Pb slitinu a jako lacinější bezolovnatá varianta pro pájení vlnou. Její vlastnosti se mimo jiné využívaly při metodě pájení FLIP-CHIP. Její neblahou vlastností je velká náchylnost ke kontaminaci, čímž dochází k nárůstu již tak vysoké eutektické teploty tání (227 °C). Vyznačuje se nižší pevností, vysokou tažností a je náchylná na cínový mor. Ve vnitřní struktuře eutektické slitiny se výrazně projevují velké dendritické β -cínové krystaly a jemně dispergovaný Cu_6Sn_5 . Výraznou nevýhodou spojenou s touto relativně lacinou slitinou, je kromě vysoké teploty tání i špatná smáčivost, nízká odolnost vůči tepelnému namáhání a horší faktor tečení. Slitina pro svou relativně nízkou cenu začala nacházet uplatnění ve výrobě jednostranných desek plošných spojů náročných na velké množství pájky. [8],[9]

Postupem času však byla tato slitina modifikována nepatrnou příměsí niklu. Odklon od základní eutektické slitiny cín/měď byl způsoben nepříjemným množstvím mŕstvků a zkratů při pájení za normálních podmínek. Zejména formaci mŕstvků se nepodařilo odstranit jakoukoli změnou nastavení parametrů procesu. Malé množství Ni zvyšuje tekutost pájky, přičemž nejvyšší vliv nastává při 0,06 %. [7]

Laboratorní výzkum slitiny Sn-Cu-Ni prokázal, že vlivem přítomnosti niklu ve struktuře klesá výskyt eutektických cínových dendritů, ale charakter tuhnutí je zachován jako u eutektika. Tato změna je výrazně patrná i na změně mikrostruktury. Primární cínové dendritické útvary, které dominují nemoifikované mikrostruktuře, téměř zmizí, pokud

strukturu budeme dotovat vhodným množstvím niklu. Výsledná struktura je téměř dokonalé eutektikum složené ze dvou eutektických fází- cínu a intermetalické Cu_6Sn_5 . [6],[8]



Obr. 5: Vliv přítomnosti niklu v eutektické slitině Sn-Cu. [6]

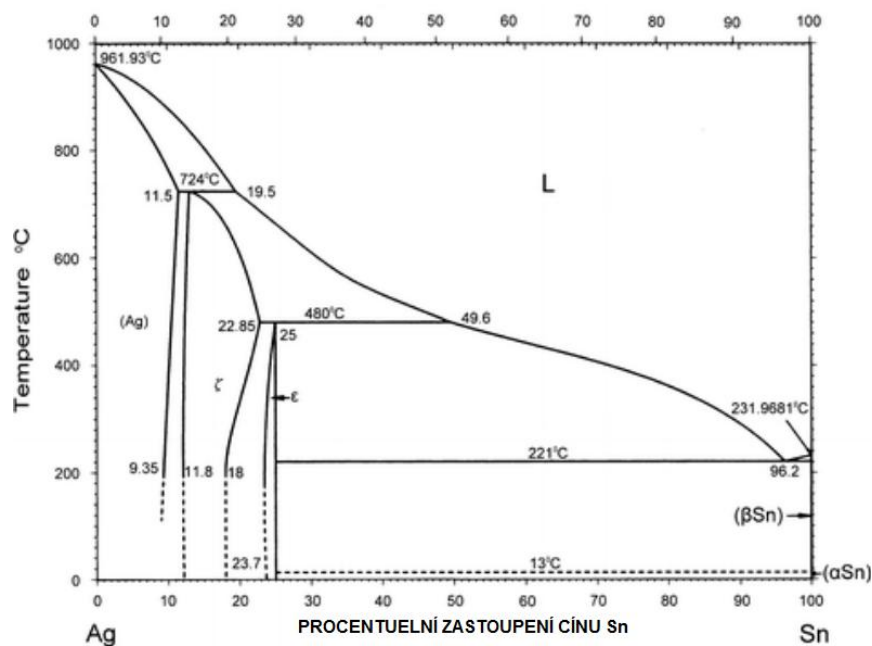
Modifikovaná varianta Sn-Cu-Ni je nyní široce používanou slitinou. Svě místo si našla v technologickém procesu pájení vlnou, pájení přetavením a povrchové úpravě pájecích plošek (HASL -Hot Air Solder Levelling).

3.2.2 Pájecí slitina cín-stříbro

Kombinace cínu se stříbrem ($\text{Sn}96,5\text{Ag}3,5$) se hojně využívá v elektrotechnickém průmyslu. Teplota, při níž začne slitina smáčet povrch, je vyšší než u slitin SAC. Teplota tání samotné slitiny je $221\text{ }^\circ\text{C}$. Přičemž samotné stříbro (Ag) s atomovým číslem 47 použité ve slitině má teplotu tání $961,8\text{ }^\circ\text{C}$ a vyskytuje se v krychlovém krystalickém uspořádání. Tepelná vodivost je výrazně vyšší než je tomu u cínu, a to $429\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Rekrytalizační teplota se pohybuje okolo $125\text{ }^\circ\text{C}$. [6], [10]

Velmi často se slitina používá v opravárenství v podobě drátu. Vykazuje dobrou kompatibilitu se slitinou $\text{Sn}99,3\text{Cu}0,7$ a se skupinou SAC. Také se používá ve formě kuliček pro technologii pájení BGA (Ball grid array). Vyšší obsah stříbra předurčuje slitinu k pájení stříbrem opatřených komponent – minimální rozpustnost stříbra. Avšak nedoporučuje se pro pájení zlata, neboť vysoký obsah cínu rozpouští zlaté povrchy. Slitina je také vhodná pro pájení nerezové oceli, kterou velmi dobře smáčí. Dále se využívá její vysoké teploty tání při

víceúrovňovém pájení (velký odstup pájecích teplot) a při pájení výkonových součástek. V porovnání s klasickou olovnatou slitinou nedosahuje zdaleka takové spolehlivosti. [6], [11]

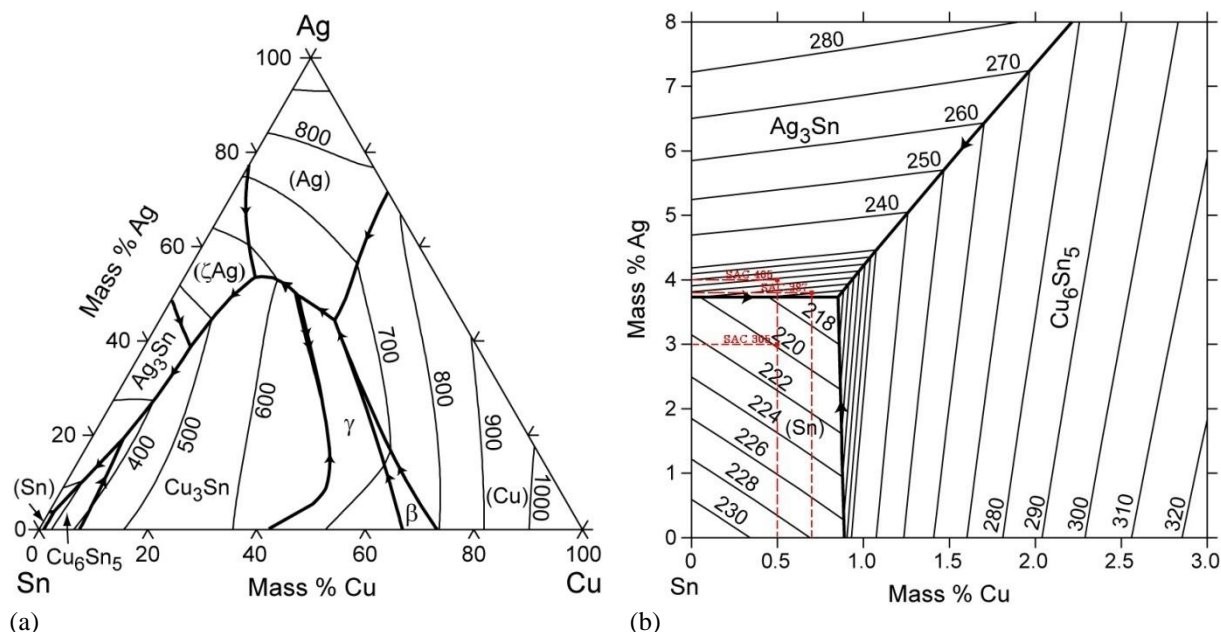


Obr. 6: Rovnovážný diagram slitiny cínu (Sn) a mědi (Cu). [11]

3.2.3 Skupina pájecích slitin - SAC

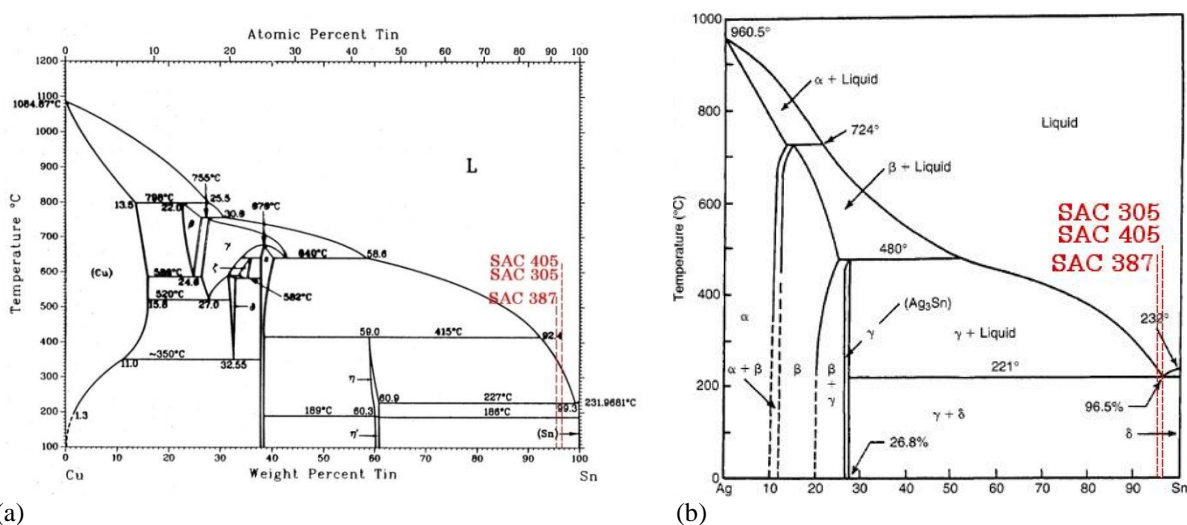
Pájecí slitina Sn-Ag-Cu má vynikající mechanické vlastnosti a odolnost vůči elektromigraci ve srovnání s eutektickou pájkou Sn-Pb. Výzkumy ukazují, že přidání antimonu Sb a dalších příměsí do slitiny (např. Ge) dochází ke zpomalení růstu intermetalických sloučenin a také se zlepšují mechanické vlastnosti pájky. Teploty tavení pájky se pohybují v blízkém okolí eutektického bodu, především se jedná o podeutektické slitiny. [10]

Stříbro (Ag) zajišťuje ve slitinách vyšší pevnost, ale oproti Pb pájkám tyto slitiny vykazují nižší tažnost. Měď obsažená ve slitině snižuje teplotu tání a zvyšuje odolnost při tepelném cyklování. Její přítomnost v pájce zvyšuje smáčivost pájky a zpomaluje rozpouštění mědi z desek plošných spojů a součástek do roztavené pájky. U některých typů pájek je použito i malého množství bismutu (Bi). Jeho přítomnost ve slitině snižuje bod tání pájky a zvyšuje smáčivost. Slitiny SAC podrobně graficky popisuje následující ternární rovnovážný diagram. Obr. 7 a). Diagram napravo Obr. 7 b) je zvětšená oblast, v níž se vyskytují níže uvedené slitiny. [10], [6]



Obr. 7: Fázový diagram slitin skupiny SAC: (a) rovnovážný fázový diagram složek Sn, Ag, Cu, (b) detailní část fázového diagramu zobrazující oblast se slitinami SAC 305, SAC 387 a SAC 405. [10]

Cín má omezenou rozpustnost s mědí a stříbrem. Jedná se o hodnoty okolo deseti procent. V opačném případě, tedy rozpustnost mědi a stříbra v cínu je mnohem nižší. V diagramech jsou zvýrazněny obsahy jednotlivých prvků zmíněných pájecích slitin. [6], [7]



Obr. 8: Fázové diagramy a v nich naznačené slitiny skupiny SAC: (a) fázový diagram cínu (Sn) s mědí (Cu), (b) fázový diagram cínu (Sn) se stříbrem (Ag). [7], [12]

3.2.3.1 Pájecí slitina SAC 305

Tato pájka je slitinou skládající se z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi (cín-stříbro-měď - Sn / Ag / Cu nebo "SAC"). Slitina v porovnání s ostatními pájkami má relativně nízký bod tání, 217 °C. Obsahuje pouze 3 % stříbra, což snižuje její cenu a také proto je v průmyslu



jednou z nejpoužívanějších pájek, především ve formě pájecí pasty pro technologii povrchové montáže (SMT – Surface Mount Technology). Slitina SAC 305 dosahuje podobných vlastností jako pájka 63Sn/37Pb pro technologii pájení vlnou a ruční pájení a prokázala velmi dobrou funkci v aplikaci SMT. Pro SMT je nejvhodnější teplota zpracování v rozmezí 235 °C až 245 °C. [6]

Při použití v procesu pájení vlnou slitina SAC305 produkuje méně strusky než jiné pájecí slitiny, zajišťuje dobré smáčení a vynikající pevnost spoje. Slitina se dodává ve formě tyčí, drátu s jádrem, pevného drátu, fólie, předem formovaných prvků, prášku a kalafunových pájecích past, nevyžadujících čištění.

Souhrnné vlastnosti: -nejlevnější slitina ze skupiny SAC
-výrazně nižší bod tavení v porovnání s ostatními bezolovnatými slitinami (217 °C – 218 °C)
-slitina Sn-Ag-Cu s nejlepším smáčením
-slučitelnost se všemi typy tavidla
-velmi dobrá spolehlivost pájeného spoje
-velmi dobrá odolnost vůči mechanickému namáhání

Další parametry pájky:

pevnost v tahu (MPa)	:	53,3
relativní prodloužení (%)	:	46
Youngův modul (GPa)	:	41,6
měrná hustota	:	7,4
koeficient měrné tepelné roztažnosti	:	21,69

3.2.3.2 Pájecí slitiny SAC387 a SAC405

Pájecí slitina SAC387 obsahuje 95,5 % cín, 3,8 % stříbro, a 0,7 % mědi (hustota pájky 7,5 g/mm³). Má velmi dobrou smáčivost a roztékavost. Jejím použitím se eliminuje vznik voidů, a to především u technologie BGA. U této pájky došlo ke snížení obsahu cínu na úkor většího množství stříbra a mědi. Slitina se tak stala finančně dražší. Vyšší příměsí mědi se nepatrně snížila teplota tání (je uváděná však stejná teplota jako u SAC 305) Především však má měď ve slitině snižovat rozpustnost měděného substrátu při pájení a snížit tak vznik intermetalických slitin. [6]

Pájka SAC405 obsahuje 95,5 % cínu, 4 % stříbra a 0,5 % mědi. Slitina je nejstarší slitinou objevenou v první polovině minulého století. Její náchylnost na kontaminaci s dalšími prvky je minimální. Ze skupiny pájecích slitin SAC má nejvyšší obsah stříbra, které by mělo zvýšit pevnost pájky. Jsou však rozpory v tom, zda vyšší příměs stříbra má vliv



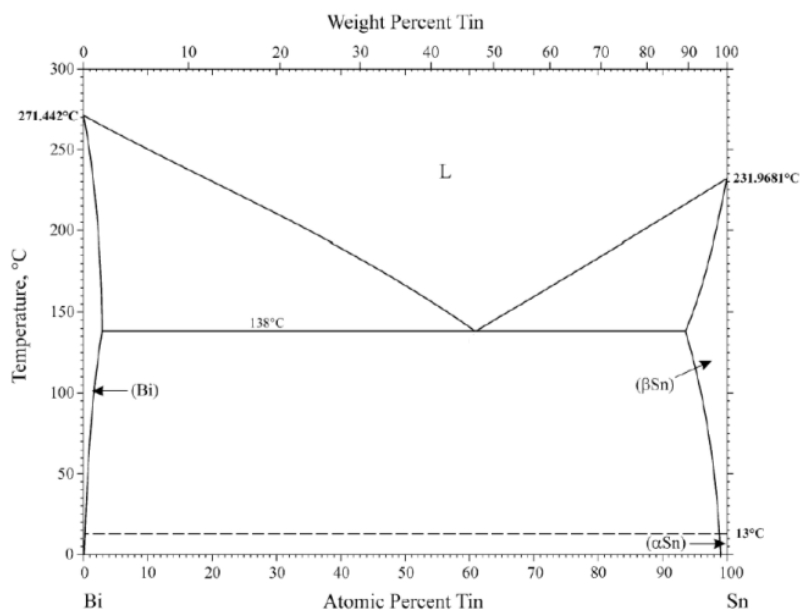
na mechanické vlastnosti oproti SAC 305. (Některé výzkumy prokazují, že zvyšující se podíl stříbra v těchto slitinách již nemá výraznější vliv na mechanické vlastnosti a spolehlivost pájeného spoje.) [13]

Stejně jako u SAC 305 i tyto slitiny jsou vhodné pro SMT technologii při pájení vlnou, přetavením i ručním pájením s vrcholnou teplotou přetavení v rozmezí 235 °C – 245 °C. Velké uplatnění našly v automobilovém průmyslu.

3.2.4 Pájecí slitina SnBi

Cín v kombinaci s bismutem vytváří z hlediska elektrotechniky další významnou slitinu; především, pokud je poměr prvků blízký eutektické teplotě.

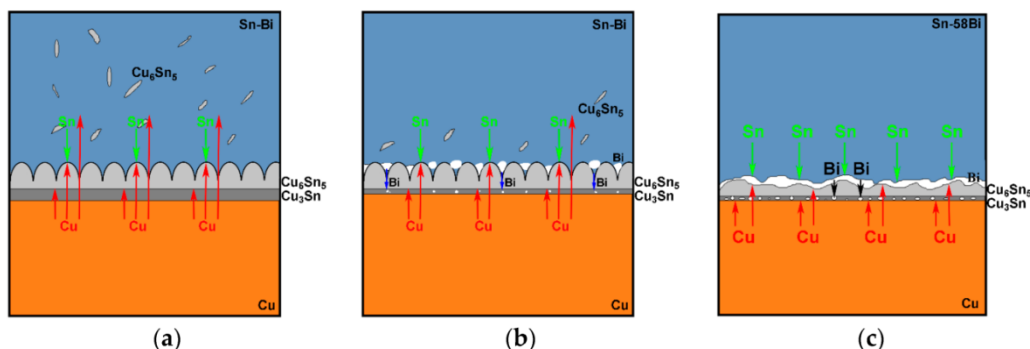
Bismut s atomovým číslem 83 a teplotou tání 271,5 °C se v čistém stavu vyskytuje s trigonální soustavou. Pokud s cínem vytvoří slitinu v poměru 58Bi42Sn, teploty fázové změny se začnou pohybovat v oblasti eutektika s výrazně nízkou teplotou tání 138 °C. Spoje realizované Sn-Bi slitinou vykazují poměrně vysokou pevnost, ale také křehkost při rázovém namáhání a také nižší pevnost ve smyku. Také vykazuje nízkou teplotní roztažnost a na rozdíl od mnoha jiných pájecích slitin dochází vzápětí po změně skupenství z kapalného na pevné téměř skokem ke smrštění a dále se rozměry již téměř nemění (v rozmezí teploty tuhnutí a pokojové teploty). Velmi dobře odolává tepelnému namáhání. Chování slitiny blíže popisuje fázový diagram. [14], [6]



Obr. 9: Fázový diagram slitiny Sn-Bi. [15]



Tak jako u ostatních slitin obsahujících cín vznikají při kontaktu s mědí intermetalické fáze, tak tomu platí i v případě slitiny cínu s bismutem. Avšak nárůstem procentuálního zastoupení bismutu v pájce dochází k blokadě nárůstu intermetalické sloučeniny (IMC – intermetallic compound). Na rozhraní mědi a pájecí slitiny nejdříve vzniká fáze Cu_3Sn , nad ní se vylučuje fáze Cu_6Sn_5 . Tato vrstva je však s rostoucím obsahem bismutu v pájce blokována vyloučenou vrstvou právě tohoto prvku. Dochází tedy k samovolnému potlačení dalšího šíření intermetalických fází. Schematicky je tento proces znázorněn na obrázku 10. [6], [11]



Obr. 10: Schématické znázornění mezifázového chování Sn-Bi slitiny na měděném substrátu
(a) Sn-5Bi/Sn-15Bi; (b) Sn-30Bi/Sn-40Bi; a (c) Sn-58Bi pájené spoje. [6]

3.3 Rovnovážný diagram

Pájecí slitiny na základě svého složení disponují rozdílnými vlastnostmi. Typ a poměr jednotlivých složek předurčuje jejich budoucí použití. Lze je však ovlivnit i vnějším působením, a to teplotním průběhem, kterému jsou vystaveny. Aby bylo možno alespoň ze základního hlediska popsat některé parametry, jsou za tímto účelem používány rovnovážné diagramy nebo také fázové diagramy.

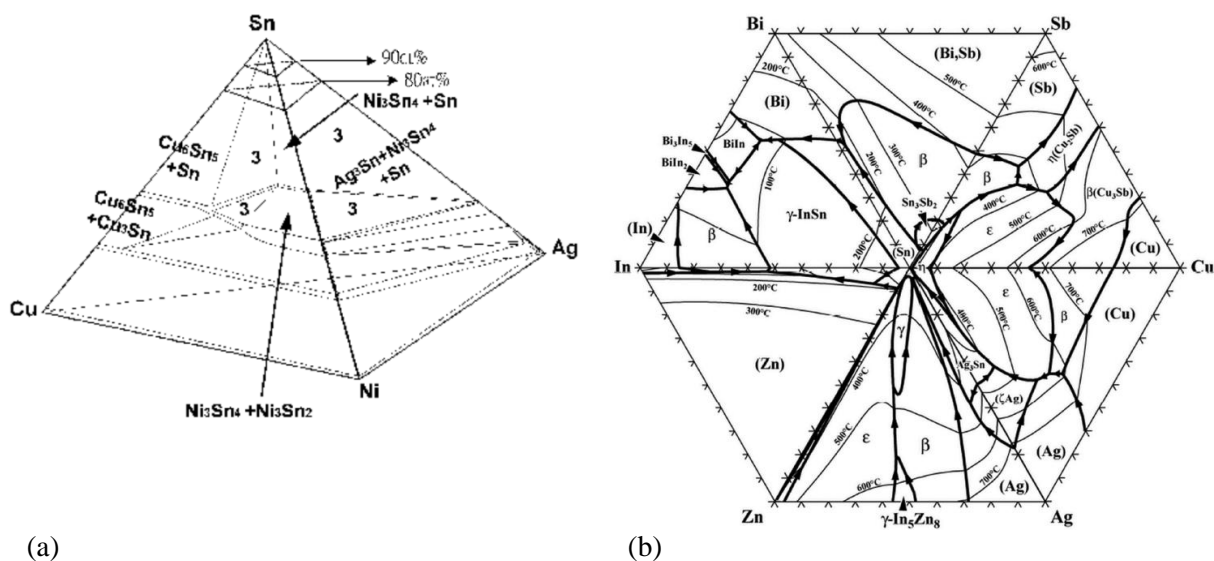
Fázové diagramy jsou uváděny vždy pro dvě a více složek, přičemž s rostoucím počtem jejich složitost výrazně roste. Diagramy zobrazují izobarické děje, při nichž je tlak roven atmosférickému ($p = p_{\text{atm}}$). Na vodorovné ose diagramu je udáváno chemické složení soustavy (pájecí slitiny) a na svislé ose teplota, při níž děje probíhají. Diagramy graficky znázorňují závislost teploty začátku a teploty konce tavení při ohřevu a teploty začátku a teploty konce krystalizace při chladnutí slitin v závislosti na jejich složení. Diagramy jsou interpretovány pomocí křivek chladnutí a fázových přeměn, počtem stupňů volnosti, rovnovážného chemického složení koexistujících fází a jejich rovnovážným množstvím. Je-li diagram rovnovážný, jsou tyto závislosti zjištěny za podmínek, při kterých je slitina v rovnováze, tedy

při kterých je splněn Gibbsův zákon fází. Chceme-li popsat jednosložkovou soustavu, postačí k popisu pouze teplota. Pro dvě složky je již zapotřebí údaj o teplotě a koncentraci. [16], [2]

Fázový diagram zobrazuje teploty, při nichž dochází k přeměnám fází, ať je to přechod z kapalného stavu do tuhého nebo přeměny probíhající v tuhém stavu. Nejčastěji se rovnovážné diagramy třídí podle rozpustnosti obou složek v kapalném a tuhém stavu na:

- s úplnou rozpustností v tuhém i kapalném stavu (například Cu a Ni),
- s úplnou rozpustností v kapalném a omezenou rozpustností v tuhém stavu (Cu a Ag),
- s úplnou rozpustností v kapalném stavu a úplnou nerozpustností v tuhém stavu,
- s úplnou nerozpustností nebo neúplnou rozpustností v kapalném stavu.

Vzhledem k polymorfii některých prvků jsou jejich rovnovážné diagramy dále komplikovány fázovými přeměnami v tuhém stavu, popřípadě u složek s částečnou rozpustností nebo úplnou nerozpustností v tuhém stavu vznikem zvláštních fází, které označujeme jako fáze intermediální. [16], [17]



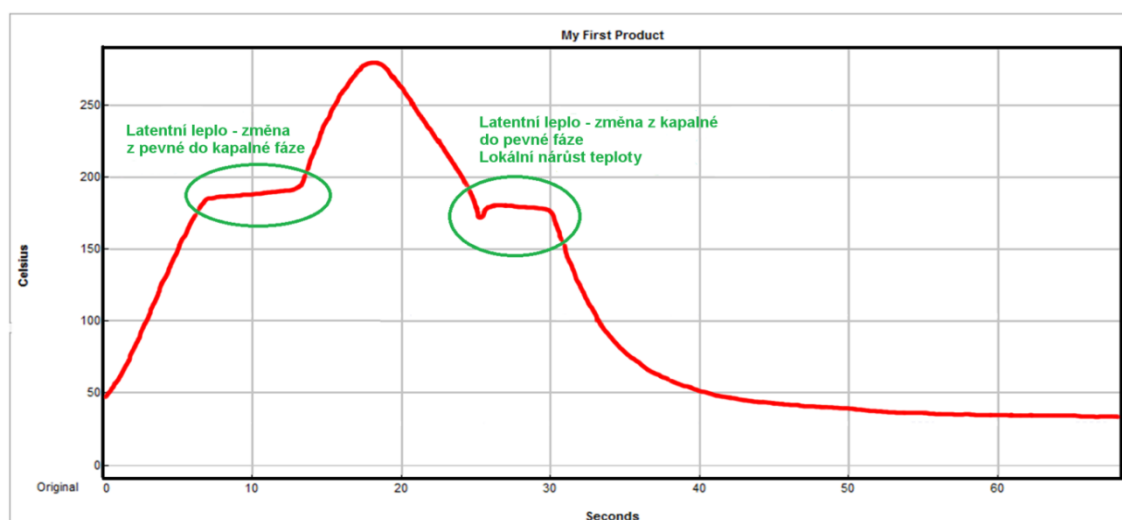
Obr. 11: Příklad fázových diagramů: (a) rovnovážný tetrahedronární diagram Sn-Ag-Cu-Ni při 210°C, (b) ternární diagram základních systémů Sn – fáze likvidu. [18]

3.4 Latentní teplo

Chladne-li slitina z fáze likvidu do solidu, struktura ztrácí energii, kterou odevzdá do okolí. Tento proces je plynulý s ohledem na teplotu okolí a gradient teploty. V bezprostřední blízkosti fázové změny začínají vznikat v homogenní tavenině zárodečná centra krystalizace (nukleační centra – oblast v objemu taveniny, kde vzniká zárodek krystalické formy při



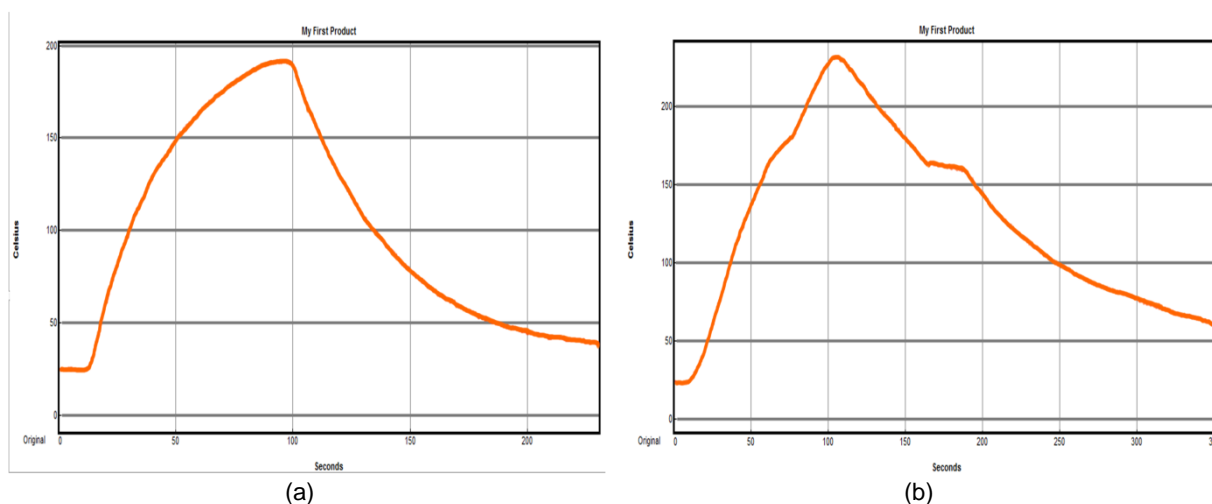
přechodu z kapalné do pevné fáze). Ve chvíli, kdy molekuly začnou zaujímat krystalické uspořádání (minimální energetickou úroveň), uvolní ze sebe větší množství energie. Uvolněné teplo předané do okolí se šíří taveninou a navyšuje teplotu. Totéž se stane na mnoha místech v okolí. V krátkém časovém úseku se v objemu taveniny začnou utvářet zárodečná centra, která uvolňují do prostoru relativně značné množství energie (energetickou vlnu). Jelikož čas uvolnění energie je velmi krátký, mnoho malých drobných příspěvků se v makroskopickém měřítku začne projevovat zpomalením poklesu teploty tuhnoucí slitiny. Pokud by byl pokles teploty samovolný a slitina se chovala ideálně, teplota slitiny by na určitý okamžik (po dobu krystalizace) stagnovala a po dobu tuhnutí by zachovávala konstantní průběh teploty v čase. Pokud bude chlazení slitiny nucené či poměr plochy a objemu slitiny bude mnohem větší, dojde pouze ke zpomalení poklesu teploty s ohledem na rychlost odvodu tepla.



Obr. 12: Teplotní profil pájecí slitiny Sn63Pb37 s projevy latentního tepla při ohřevu a tuhnutí.

Může však nastat jev zcela opačný. Každá složka taveniny, tedy prvek, má odlišné parametry, pro změnu skupenství potřebuje absorbovat či uvolnit jiné množství energie při totožném objemu. U každé složky v základním stavu se tak děje při jiné teplotě. Pokud stojí roztavená slitina na prahu vstupu do pevné fáze, začnou vznikat krystalické zárodky, které generují lokální energetické vlny, díky kterým se začne teplota systému opět zvedat. Rovněž závisí na tom, jakým prostředím se uvolněná energie šíří, tedy jakou má tepelnou vodivost. Šířící se energie se z jednotlivých center sčítá a v závislosti na složitosti systému (množství a objemu jednotlivých složek) je systém díky drobným příspěvkům celistvě ohříván. Výsledná teplota stoupá v závislosti na tepelné vodivosti, objemu a způsobu ochlazování dokud není nalezena rovnováha mezi působícími vlivy. V této fázi tuhnoucí část přecházející do krystalického stavu generuje tepelnou energii, tepelný odpor se podílí na nárůstu teploty,

lokality na hranici či těsně za hranicí krystalizace opět vstupují do kapalného skupenství a po krátké době opakují předchozí cyklus. V důsledku uvolňování energie do okolí je proces ztrátový a teplota systému postupně klesá. Pokud teplota klesne natolik, že se jednotlivá nukleační centra mezi sebou propojí, pokles teploty se vzápětí vrací zpět na původní křivku. Každý typ slitiny je v tomto ohledu unikátní, a to díky poměru jednotlivých složek, které ve výsledku upravují celkové uvolněné latentní teplo a tepelnou vodivost systému.

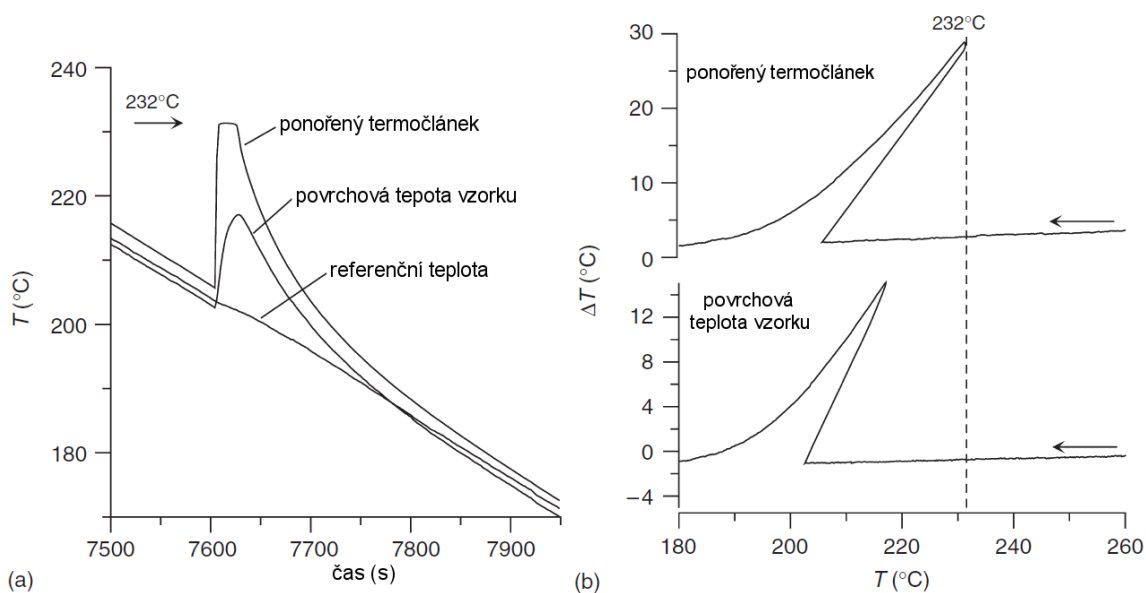


Obr. 13:(a)Ideální teplotní profil desky plošných spojů (FR4) bez přítomnosti slitiny (bez projevu latentního tepla). (b)příklad teplotního profilu desky plošného spoje (FR4) s 25mg pájecí slitiny Sn60Pb40 na povrchu pájecí plošky.

Tyto změny teploty v oblasti tuhnutí pájecí slitiny (solidifikace) mohou být jedním z často opomíjených faktorů při vývoji mikrostruktury pájecích slitin. Především je prodlužována doba expozice samotné pájecí slitiny zvýšenou hodnotou teploty. Tato skutečnost zapříčiňuje nárůst intermetalických slitin v objemu pájeného spoje. Avšak v rámci jednoho pájeného bodu je tento jev přirozený a nelze jej v běžné praxi obejít. Situace se však změní, pokud tento spoj nebude sám, ale bude součástí většího celku, třeba na desce plošného spoje. V této situaci se výše popsany proces odehrává v mnoha pájecích bodech po celé desce. Samozřejmě množství pájecí slitiny použité na jeden pájený spoj je malé, a tedy je malá i energie vycházející z něj. Ale pokud jsou body dostatečně blízko nebo jsou spojeny vodivou cestou, bude vzájemný vliv již znatelný a expozice některých bodů se bude prodlužovat vyšší úrovní tepla. Tato situace nastává kupříkladu u technologie pájení součástek BGA, kde je integrace velkého počtu pájecích bodů na malé ploše velmi vysoká. I když jsou všechny pájecí plošky stejně veliké a dávkovací zařízení na ně nanese stejné množství pájecí pasty, pravděpodobnost toho, že by tuhnutí začalo u všech bodů ve stejný okamžik je zanedbatelná. Pokud si tuto vlastnost představíme u SMD součástky se dvěma vývody (například SMD

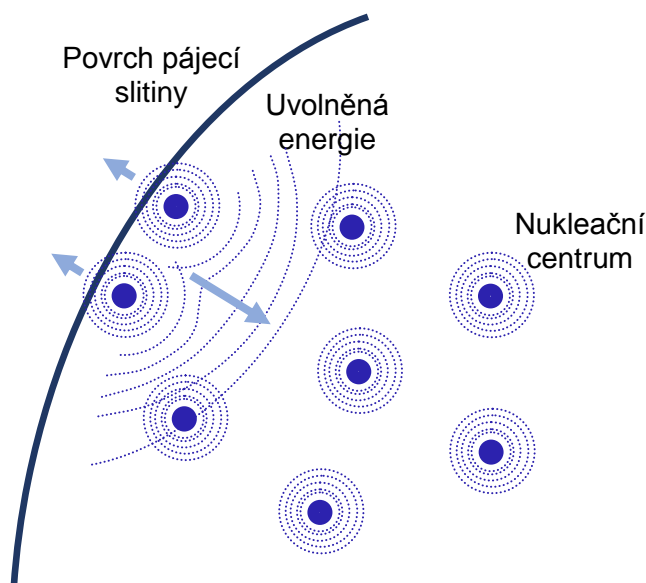


rezistor) a jeden z pájecích bodů dojde do stavu solidu dříve, vygeneruje zároveň tepelnou energii, která je z části pohlcena druhým pájecím bodem. Tím se prodlouží doba jeho kapalně fáze. Na základě této skutečnosti může dojít k částečnému nebo úplnému vztyčení součástky tzv. tombstone effect. Zde se tepelná energie přenáší především přes samotnou součástku. Ale pokud jsou pájecí body propojeny vodivou cestou, je vliv tepelného přenosu mnohem výraznější.



Obr. 14: (a) Graf teploty v závislosti na čase zobrazuje fázi podchlazení čistého cínu. Je zde zobrazena teplota povrchu vzorku, referenční teplota a teplota uvnitř pájecí slitiny. Před ztuhnutím slitiny se na průběhu projevuje výrazné podchlazení, které způsobilo velmi rychlý a krátkodobý nárůst teploty. (b) Přidružený graf DTA pro oba termočláanky; hmotnost měřeného vzorku slitiny 163,2 mg, rychlost ohřevu 5K/min. [19]

Avšak počátek celého cyklu se odehrává již od pokojové teploty. Začneme-li slitinu zahřívat konstantní rychlostí, teplota slitiny kopíruje teplotní profil až do chvíle fázové změny. V této chvíli začne jev zcela opačný vůči předchozímu stavu. Při teplotě velmi blízké teplotě tání slitiny se nárůst teploty zastaví a stává se v čase téměř konstantním. Struktura absorbuje energii, aby mohlo dojít k rozbití jejího krystalického uspořádání a přešla tak do fáze likvidu. Přeměna fáze se pak ze zárodečných ložisek lavinovitě šíří do celého objemu. Teplota slitiny se opět vrací k původní rostoucí tendenci, ale látka je již v celém svém objemu kapalná.



Obr. 15: Uvolňování tepelné energie z lokálních nukleačních center a její šíření do prostoru. Centra se začínají tvořit od povrchu směrem ke středu a uvolňují do okolí energii, která je částečně odváděna povrchem a částečně spotřebována na opětovné vrácení slitiny do kapalného stavu v kterém setrvává po patřičnou dobu.

V celém cyklu tedy vynikají dvě oblasti – přechod z pevné fáze do kapalné (tání) a proces obrácený, z kapalně fáze do pevné (tuhnutí). Tyto změny se však u většiny slitin neodehrávají při téže teplotě, kdy se projevuje tzv. hystereze (rozdílná teplota tání a tuhnutí). Aby bylo možno rozbít pevné vazby mřížky při procesu tání, je třeba dodávat energii s mírně vyšším potenciálem. Naopak, chceme-li látku převést z kapalné do pevné fáze, je zapotřebí mírný pokles potenciálu, aby látka z neuspořádaného stavu přešla do uspořádaného stavu mřížky a molekuly stačily uvolnit přebytečnou energii, která brání zaujmout minimální energetický stav v mřížce. Stav, kdy při ochlazení látky je teplota tuhnutí nižší než teplota tání, se označuje jako stav podchlazení (supercooling, nebo také undercooling). Při poklesu teploty na teplotu tání začínají vznikat v tavenině zárodečná centra; u každé látky tento proces trvá jinou dobu. Pokles teploty však stále trvá, na vzniklá nukleační centra se začínají nabalovat další molekuly a generuje se latentní teplo. Struktura se díky tomu začne v průběhu ochlazení znovu zahřívat.

3.5 Šíření tepla

Teplo uvolněné v průběhu skupenské změny (přechod kapalné do pevné fáze) během níž se generuje latentní teplo, se z povrchu slitiny šíří do prostoru. Jde o krátkodobý jev s ohledem na objem a velikost plochy pájecí slitiny. Krátkodobě se změní gradient teploty,

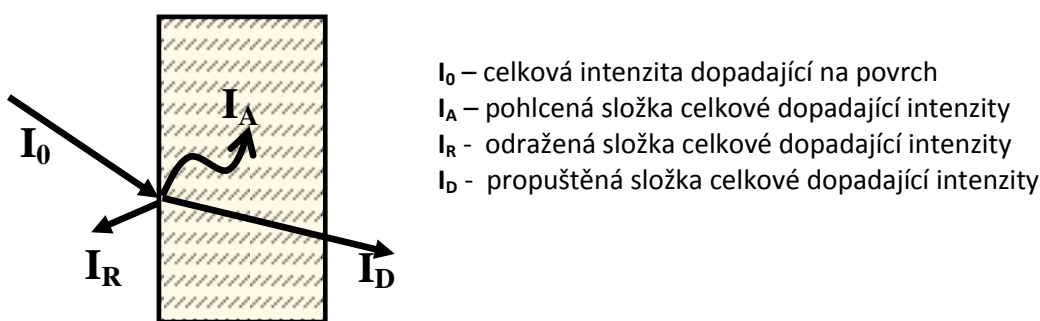
vše ostatní v okolí bodu chladne, pouze teplota slitiny roste. Teplo se šíří třemi základními způsoby: prouděním, sáláním a vedením.

3.5.1 Šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním je dominantou především u kapalných a plyných látek a také u plazmatu. Jednotlivé části hmoty mají odlišnou teplotu a tedy i hustotu. Dochází tak k vzájemnému pohybu a přenosu energie. Pokud uvážíme rozložení pájecích bodů na desce plošného spoje, je vliv této složky zanedbatelný.

3.5.2 Šíření tepla sáláním

Přenos tepla sáláním se v tomto případě také zúčastňuje velmi malým dílem. Každé těleso vyzařuje energii v podobě elektromagnetického záření. Z hlediska šíření tepla má největší význam infračervená složka, která je velmi dobře pohlcována tělesy. Energie záření se po dopadu na těleso mění v tepelnou energii. Šířka infračerveného spektra sahá od 780 nm do 360 μm . Velikost vyzářené nebo pohlcené energie závisí na několika základních principech, a to na teplotě tělesa, barvě povrchu, jeho emisivitě a ploše. Tato energie se při dopadu na jiné těleso z části odrazí, z části tělesem prochází a z části je daným tělesem pohlcena. [20]



Obr. 16: Rozklad dopadajícího záření na jednotlivé složky při dopadu na pevnou látku.

Emisní součinitel nebo také součinitel pohltivosti $\varepsilon = \frac{I}{I_0}$ nabývající hodnot 0 až 1 vyjadřuje schopnost pohltit či vyzářit energii na základě vlastnosti a barvy povrchu (absolutně černé těleso má $\varepsilon = 1$, hladká lesklá plocha se blíží nule).

I – vyzařovaná intenzita reálného tělesa

I_0 – intenzita ideálního černého tělesa

Pokud jednotlivé složky záření sečteme, musí jejich poměry dát dohromady jeden celek, tedy 1. [20]

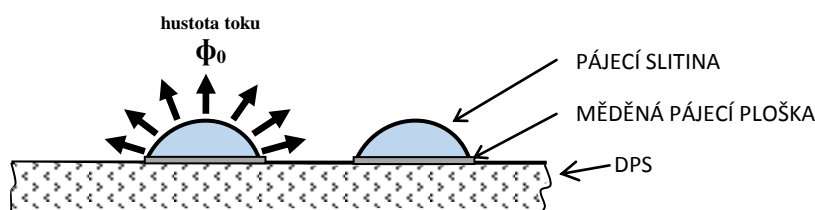
$$R(\lambda) + T(\lambda) + A(\lambda) = 1 \quad (1)$$

$$R_\lambda = R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad [] \quad \text{– spektrální odrazivost} \quad (2)$$

$$A_\lambda = A(\lambda) = \frac{I_A(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad [] \quad \text{– spektrální pohltivost} \quad (3)$$

$$T_\lambda = T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad [] \quad \text{– spektrální propustnost} \quad (4)$$

Pokud vztáhneme výše zmíněné základní parametry na pájené body umístěné na desce plošného spoje (DPS), je vliv vyzařované energie z jednoho pájeného bodu do druhého minimální. Vzhledem k zakřivení ploch a jejich vzájemné vzdálenosti, je hustota toku z jednoho bodu na druhý minimální. A pokud vezmeme v úvahu emisní součinitel cínu $\varepsilon = 0,05$ je teplotní vliv jednoho bodu na druhý zanedbatelný. [21]



Obr. 17: Schematické uspořádání pájecích bodů na DPS.

3.5.3 Šíření tepla vedením

Přenos tepelné energie vedením (kondukcí) se uskutečňuje především v pevných látkách, zatímco v kapalinách a plynech pouze za jistých podmínek, např. zahřívá-li se vodorovná vrstva kapaliny nebo plynu shora. Obecný základ vedení tepla vychází z Fourierova zákona:

$$\vartheta = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \quad [W.m^{-2}] \quad \text{– hustota tepelného toku} \quad (5)$$

ϑ vyjadřuje množství tepla v [J], které projde jednotkou plochy kolmou na směr proudění za jednotku času; dx/dt se nazývá teplotní gradient – vyjadřuje poměr přírůstku teploty dt ke vzdálenosti dx mezi izotermními plochami ve směru rovnováhy. [22], [23]

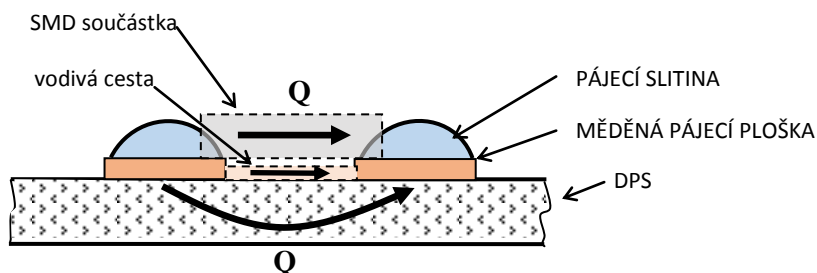
$$\text{grad } t = \frac{dt}{dx} \quad [K.m^{-1}] \quad \text{– teplotní gradient} \quad (6)$$



Teplotní růst se ve směru poklesu teploty t označuje záporným znaménkem – tepelný tok proudí proti směru teplotního gradientu. [22]

$$Q = \vartheta \cdot A = \lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot A \text{ [W]} - \text{množství prošlého tepla za časovou jednotku} \quad (7)$$

Plocha skrze níž teplo prochází je $A \text{ [m}^2\text{]}$ [23]



Obr. 18: Schematické uspořádání pájecích bodů na DPS a možných cest pro vedení tepla.

Vliv této složky přenosu tepla je pro danou situaci dominantní. Pokud uvažíme dva vedle sebe umístěné pájecí body na měděných pájecích ploškách desky plošného spoje, existuje mezi nimi pevné propojení.

Pokud stojí osamoceně, je přenos možný přes substrát DPS, který bývá na epoxidovém základu s různými plnivy. V tomto případě je přenos pomalejší, tepelná vodivost substrátu bývá nízká a také dochází k přenosu tepla do všech směrů substrátu.

Mezi oběma body však může být vložena součástka, jejíž tepelná vodivost bývá obecně vyšší a přenos z hlediska směru je přímější. Tedy i množství přenesené energie z jednoho pájecího bodu na druhý je výrazně vyšší.

Nejvyššího přenosu mezi body je však dosaženo, je-li spojnicí obou vodivá cesta mezi pájecími ploškami. Měď jakožto nejčastější materiál má nejen výbornou elektrickou, ale i tepelnou vodivost, a proto i množství energie uvolněné při tuhnutí prvního pájecího bodu se z velké části přenesou k druhému bodu, který začal tuhnout o zlomek vteřiny dříve.

3.6 Intermetalické vrstvy

Latentní teplo uvolňované při procesu tuhnutí závisí na mnoha faktorech, a to jak z pohledu objemu uvolněné energie v čase, tak z pohledu rychlosti šíření do prostoru. Jisté působení na tento proces se připisuje i intermetalickým vrstvám, které vznikají na rozhraní pájecí slitiny a substrátu. [8]

3.6.1 Vznik a vlastnosti intermetalické sloučeniny

Při procesu pájení, kde je základním předpokladem dobrá smáčivost obou materiálů a jejich zahřátím společně s tavidlem na pracovní teplotu, se ve většině případů vytvoří přechodové oblasti, které mají jiné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti než spojované materiály. Přechodová oblast má rozhodující vliv na vlastnosti a kvalitu pájeného spoje. Vlastnosti pájeného spoje jsou výrazně ovlivňovány přítomností intermediálních fází. Jejich vznik na hranici základního materiálu a pájky může probíhat:

- vzájemnou reakcí tekuté pájky a základního materiálu
- částečným rozpouštěním základního materiálu s následným vyloučením intermediální fáze na hranici pevného základního materiálu

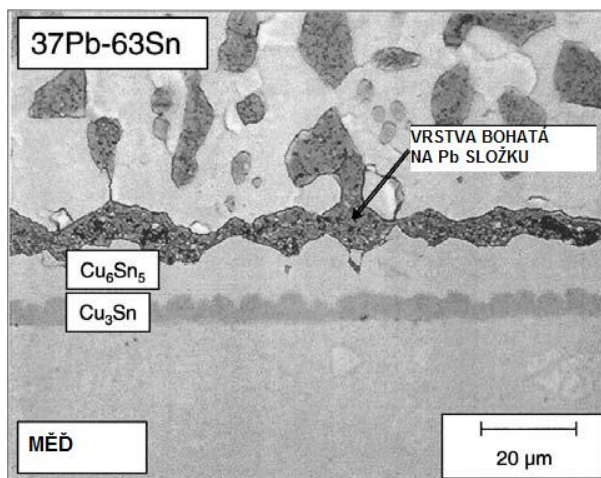
Primárně vyloučená fáze se může např. změnit v jiný typ, a to ochlazováním pájeného spoje nebo jeho tepelným zpracováním. Čím je větší vzájemná rozpustnost prvků pájky a základního materiálu, tím je přechodová oblast širší. Difúze v pájeném spoji mění chemické složení pájky a základního materiálu a vytváří přechodové oblasti. Její tloušťka vzrůstá s teplotou a dobou pájení. Ve srovnání se základním materiálem a pájkou je obvykle křehčí. Je proto žádoucí vytvořit tuto vrstvu jen tak tlustou, aby spoj byl pevný, ale nikoliv křehký. [17]

Proces tvorby intermetalických sloučenin je velmi dobře zmapován u eutektických nebo téměř eutektických olovnatých pájecích slitin používaných nejčastěji s měděným substrátem. Tento proces lze ovšem přenést i na bezolovnaté pájecí slitiny, kde bývá zastoupení cínu v pájecí slitině ještě vyšší.

Po zahřátí nad teplotu tání pájecí slitiny dochází ke smočení pájky a na rozhraní s mědí se rychle vytvoří tenká vrstva intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 (fáze η) o tloušťce několika desetin mikrometru. Přítomnost této vrstvy zajišťuje dobré smočení a vytvoření pevné vazby mezi pájkou a kovem. Sloučenina se tvoří i po snížení teploty a ztuhnutí pájky. Příčinou je difúze atomů mědi do atomů pájky a atomů cínu do mědi. Tato intermetalická sloučenina má šedou barvu, teplotu tání přibližně 415 °C. V oblasti intermetalické fáze se pájka stává bohatší na obsah olova úbytkem cínu, tím klesá rychlost růstu intermetalické fáze. Za určitých podmínek na rozhraní mezi mědí a Cu_6Sn_5 dochází k tvorbě druhé intermetalické vrstvy Cu_3Sn (fáze ϵ) s vyšším obsahem mědi. Cín-olovnatá pájka tuto vrstvu nesmáčí, to je možné jen pokud se opět vytvoří vrstva Cu_6Sn_5 . Vrstva Cu_3Sn se tvoří tehdy, je-li bráněno difuzi



cínu do mědi a je-li podporována difuze mědi do pájky. Stává se tak při vyšších teplotách. Teplota tání vlastní vrstvy je vyšší než 670 °C a její barva je tmavě šedá. [9]



Obr. 19: Mikroskopický snímek oblasti rozhraní měděné vrstvy (Cu) a vrstvy eutektické slitiny Sn63Pb37, kde se po 400 dnech při 135 °C vytvořily vrstvy intermetalických sloučenin. [24]

Tvorba intermetalických sloučenin u bezolovnatých pájecích slitin nevzniká jen na rozhraní s měděným substrátem. V mnoha pájkách je obsažena jako základ slitiny (např. skupina SAC, Sn-Cu,...), intermetalické sloučeniny se tvoří tedy i v objemu pájeného spoje. Intermetalická sloučenina má také odlišnou tepelnou vodivost, na rozdíl od základních materiálů (viz Tab. 1), a tak ovlivňuje vedení tepla do okolí. Vznik intermetalických sloučenin ve fázi likvidu je také doprovázen spotřebou energie na molekulární přeměnu.

Tab. 1: Vybrané parametry základních prvků, pájecích slitin a intermetalických sloučenin [25],[8],[26]

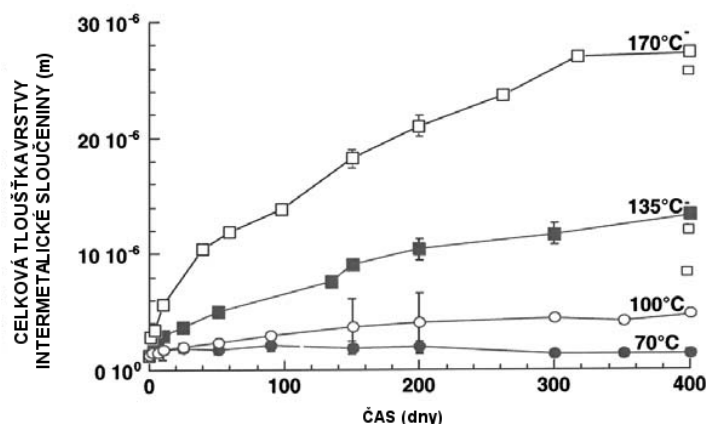
Materiál	Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita [J/kg·K]	Hustota [g/cm ³]	Rezistivita [μΩ·cm]	Koeficient teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ /K]
Olovo (Pb)	35,3	129,0	11,3	20,6	29,0
Cín (Sn)	66,8	227,0	7,3	11,5	27,0
Měď (Cu)	386,0	383,0	9,0	1,7	16,8
Stříbro (Ag)	429,0	235,0	10,5	1,5	19,0
Bismut (Bi)	7,9	---	9,8	1,2	---
Nikl (Ni)	61,0	446,0	8,9	6,9	13,0
Sn63Pb37	50,0	167,0	8,4	14,5	25,0
Sn99,3Cu0,7	66,0	---	7,3	13,0	20,0
Sn96,5Ag3,5	55,0	---	7,5	12,3	22,0
Sn96,5Ag3,0Cu0,5	58,0	---	---	---	---
Sn95,5Ag3,8Cu0,7	60,0	---	7,5	13,0	---
Bi58Sn42	19,0	---	---	---	---
Cu ₆ Sn ₅	34,1	286,0	8,3	17,5	16,3
Cu ₃ Sn	70,4	326,0	9,0	8,9	19,0
Ni3Sn ₄ ^a	20,0	---	---	---	13,7

Tloušťka vytvořených intermetalických vrstev závisí na čase a teplotě při určité aktivační energii, která pro souhrnnou tvorbu intermetalických vrstev (η + ε) popisovaného systému Sn – Cu nabývá hodnot 0,43 eV. Růst intermetalických vrstev vyjadřuje vztah: [9]

$$\delta = 10^3 \cdot \exp \frac{5 \cdot 10^3}{T} \sqrt{t} \quad (8); \quad \delta - \text{tloušťka intermetalických vrstev } \eta + \varepsilon \text{ } [\mu\text{m}]$$

t – čas [s]

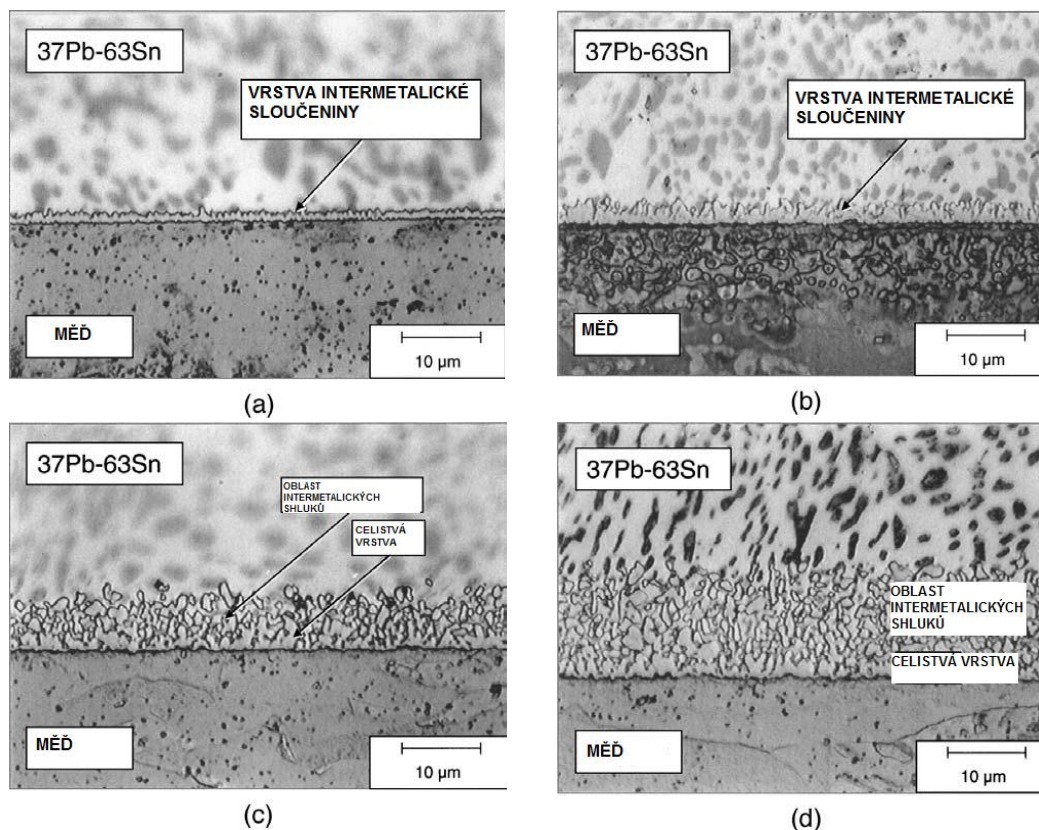
T – teplota [K]



Obr. 20: Graf zobrazující závislost přírůstku celkové tloušťky intermetalické vrstvy (η + ε) na čase pájecí slitiny Sn63Pb37. [27]



Z tohoto důvodu délka doby, kdy slitina setrvává v kapalně fázi, a výše teploty mohou mít vliv na výsledné množství uvolněného latentního tepla.



Obr. 21: Mikroskopický snímek oblasti hranice mědi (Cu) a eutektické slitiny Sn63Pb37 s vyrůstající vrstvou intermetalické sloučeniny. Přetavení slitiny bylo provedeno při 215 °C po dobu (a) 5 s, (b) 60 s, (c) 300s, (d) 900s. [28]

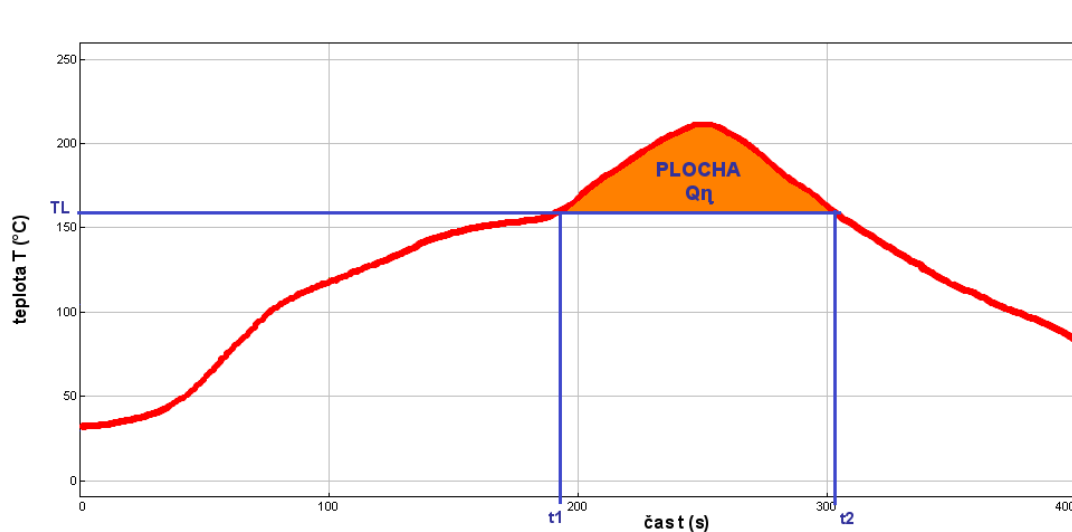
3.7 Heating factor

Aby mohly být osazené součástky na desce plošného spoje připájeny, musí dojít k přetavení pájecí slitiny, která součástky a desku vodivě propojí. Celý komplet je tak vystaven vysoké teplotě, která se mění dle přednastaveného teplotního profilu. V okamžiku dosažení teploty tání a prvního projevu latentního tepla vstupuje slitina do kapalně fáze. V závislosti na době, výši teploty, typu slitiny a typu substrátu dochází v tavenině ke změnám složení a tím i ke změně základních parametrů, jakými je například tepelná vodivost či objem latentního tepla pájeného spoje. Jednou z možností jak kvantifikovat tyto působící vlivy je parametr označovaný jako „Q factor“ či „Heating Factor“.

Heating factor (factor Q) byl vytvořen k hodnocení teplotní křivky, tedy zda teplotní profil naměřený na pájecí slitině se příliš neodlišuje od zadaného. Lze tak na jeho základě

upravovat procesy pájení, tak aby co nejlépe kopírovaly potřeby dané situace. Heating faktor je definován jako integrál naměřené teploty nad bodem tavení T_L a dobou kterou slitina setrvává v kapalném stavu; kde $T(t)$ je měřená teplota v časovém rozmezí $(t_1 - t_2)$. Integrál teploty v čase je označen Q_η a jeho matematické vyjádření je definováno: [29], [30]

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_L) dt \quad [s \cdot K] \text{ nebo } [s \cdot ^\circ C] \quad (9)$$

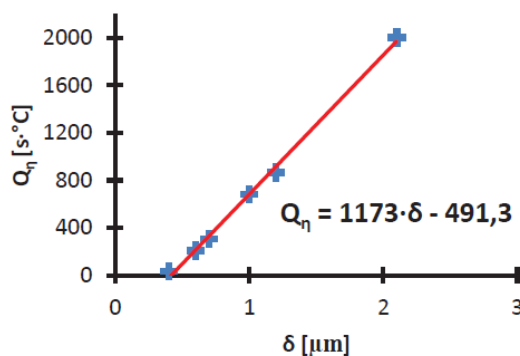


Obr. 22: Principiální znázornění odečtu parametrů pro výpočet celkového Q_η symbolizovaného oranžovou plochou – „Heating factor“.

Integrál teploty a času má významný vliv na tvorbu intermetalické vrstvy a na její morfologii. Spolehlivý pájený spoj nemůže být vytvořen, pokud je hodnota Q_η příliš malá, a to i při dodržení vysoké teploty nebo doby trvání pájky v kapalném stavu. Bylo experimentálně zjištěno, že tloušťka intermetalické vrstvy se téměř lineárně zvyšuje s přírůstkem Q_η až do dosažení saturační hodnoty. Experimentálně bylo také zjištěno, že tato hodnota se pohybuje okolo 3 μm při použití pájky Sn63Pb37 na měděné pájecí ploše. [31] Na základě těchto zjištěných hodnot byla stanovena přibližná rovnice závislosti tloušťky intermetalické vrstvy na velikosti Q_η pro pájku Sn63Pb37, tato rovnice je uvedena níže.

$$Q_\eta = 1174 \cdot \delta - 491,3 \quad [s \cdot ^\circ C] \quad (10)$$

δ – střední tloušťka intermetalické vrstvy ($\eta + \varepsilon$) v μm



Obr. 23: Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na Q_η . [31]

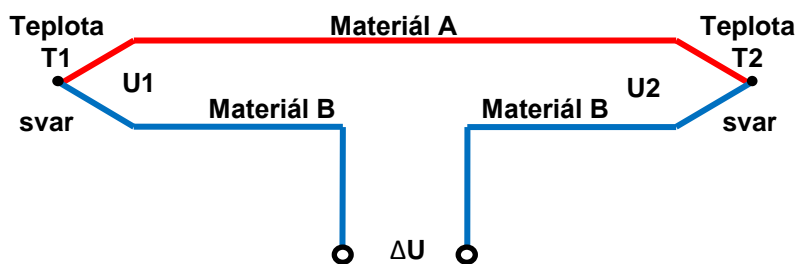
3.8 Měření latentního tepla

Projev latentního tepla v průběhu ohřevu a chladnutí pájecí slitiny je poměrně rychlý děj, který je nutno velmi přesně zaznamenat. Samotné působení závisí na objemu, typu a ploše, kterou pájka v prostoru zaujímá. Na základě toho může děj trvat zlomky vteřin, ale také minuty či desítky minut. Avšak náběh či začátek, kdy se mění gradient teploty, bývá vždy krátkým okamžikem. Ideální variantou by byla bezkontaktní a velmi přesná technologie, která snad v budoucnu bude teprve vyvinuta. Nabízí se tedy fyzické měření každého bodu zvlášť, například pomocí termočlánků.

3.8.1 Termočlánek

Vhodným řešením pro nastíněnou situaci je termočláneková sonda umístěná do bezprostřední blízkosti samotného pájeného spoje s fyzickým kontaktem s měřenou plochou.

Termočláanky využívají termoelektrického jevu, který byl objeven roku 1821 německým fyzikem Seebeckem, tedy Seebeckův jev. Pokud umístíme vodič tak, že jeho konce budou mít různé teploty, vzniká mezi nimi určité malé napětí. Velikost tohoto napětí je závislá na použitém materiálu a na rozdílu teplot na obou koncích vodiče. Vezmeme-li k tomu ještě druhý vodič z jiného kovu a na jednom konci oba kovy vodivě spojíme (svaříme), pak na volných koncích naměříme rozdíl těchto napětí obou vodičů. V neuzavřeném obvodu lze tedy mezi oběma spoji dvou kovů naměřit takzvané termoelektrické napětí ΔU , které je dáno rozdílem kontaktních napětí vznikajících na obou koncích daných kovů. Měřené napětí je v řádech několika μV na $^\circ\text{C}$. [32], [33]

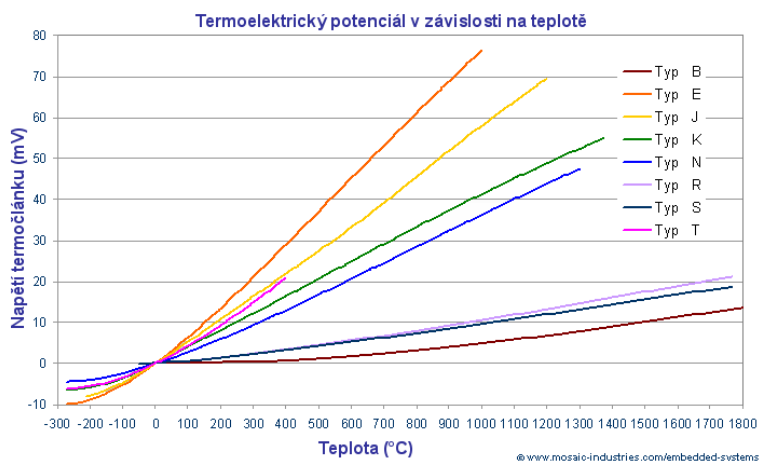


Obr. 24: Schematické uspořádání termočládku.

Proto tedy platí: $\Delta U = U_1(T_2) - U_2(T_1)$. Indexy u obou kontaktních napětí jsou stejné - jedná se o dvě napětí, která vznikají na rozhraní stejných kovů. Fakt, že jedno kontaktní napětí je vyšší než druhé, je dán pouze rozdílem teplot obou spojů. Jelikož závislost termoelektrického napětí na teplotě není lineární, volí se použití termočládků tak, aby v rozsahu použitých teplot se tato závislost dala považovat za lineární. Toto lze uvažovat pro malé rozsahy teplot T_1 a T_2 obou konců daných kovů. Pokud by rozdíl teplot obou rozhraní kovů byl větší než zhruba několik desítek kelvinů, bylo by nutné místo lineárního vztahu použít vztah složitější. Napětí by tak nebylo již přímo úměrné rozdílu teplot, ale ve výrazu by se objevily i kvadratické členy, kubické členy a další. Princip schematického uspořádání termočládku je zobrazen na Obr. 24. V praxi by však takovéto uspořádání pro měření nebylo praktické, používá se proto místo termočládku s referenční teplotou tzv. kompenzace studeného konce. Nejčastěji se používá konkrétní kompenzace pro konkrétní typ termočládku, ale lze ji provést i jako univerzálně programovatelnou. Kompenzace upravuje napětí tak, aby byl eliminován vliv parazitních termočládků na vedení. [33]

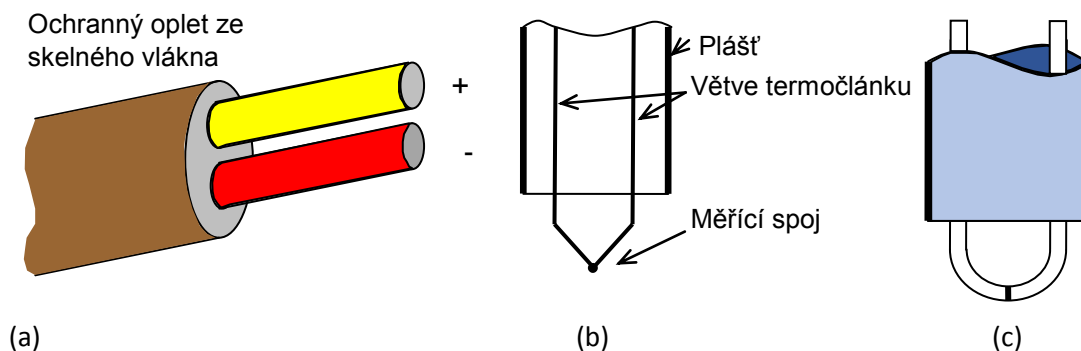
Typ termočládku je třeba zvolit na základě konkrétní aplikace. Vztáhneme-li situaci na měření latentního tepla pájecích slitin, konkrétně pájených spojů, je třeba vzít v úvahu malý rozměr měřeného objektu a zaznamenání rychlých změn na tepelném profilu. Sám termočlánek nesmí svou přítomností výrazně ovlivnit měření, neboť jeho tepelná kapacita a vodivost by mohly výrazně ovlivňovat naměřené hodnoty. Také je třeba měřit tepelnou změnu v konkrétním bodě. Proto svařený spoj obou kovů termočládku musí být velmi malý, jinak by plocha spoje integrovala průměrnou hodnotu, nikoli reálnou. Vhodným řešením jsou termočládkové sondy typu K vyrobené z velmi tenkého drátu do průměru 0,2 mm. Odvod tepla z místa měření je minimální, termočládky disponují velmi rychlou odezvou a s malými rozměry hrotů jsou schopny měřit malé lokální plošky.





Obr. 25: Charakteristiky jednotlivých typů termočlánků. [34]

Termočlánky typu K jsou svým složením založeny na slitinách niklu. Sonda pro měření tavení pájecích slitin musí být zároveň tepelně a mechanicky odolná. Vhodné jsou typy se skleněným opletem. Zároveň by sonda měla mít co nejlepší fyzický kontakt s měřenou oblastí. Vodič s kladnou polaritou (označen žlutě) – vyroben ze slitiny „chromel“ obsahující 90 % Ni a 10 % Cr. Vodič se zápornou polaritou (označen červeně) tvořen slitinou „Alumel“ obsahující 95 % Ni, 2 % Mn a 2 % Al. Sonda je schopna měřit v teplotním rozsahu od -270 °C do $+1372\text{ °C}$ (napětí: od $-6,456\text{ mV}$ do $+54,856\text{ mV}$). Doba odezvy při teplotním skoku ($93\text{ °C} / 38\text{ °C}$) je $0,04\text{ s}$. Vhodným provedením měřicího konce je nechráněný spoj svařený natupo.

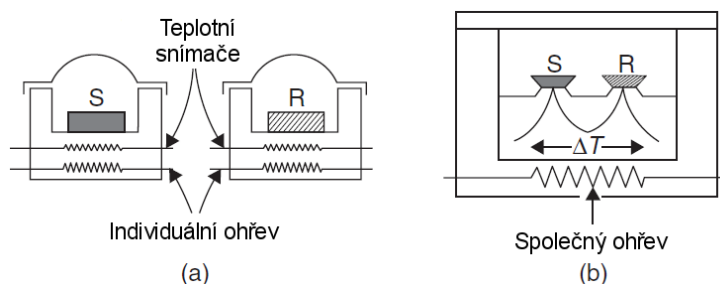


Obr. 26: Schematické znázornění termočlánku: (a) barevné označení vodičů, (b) nechráněný spoj, (c) tupý svar.

3.8.2 Diferenční skenovací kalorimetrie

Diferenční skenovací analýza (**DSC** – *Differential Scanning Calorimetry*) je nástupcem diferenční termické analýzy, která je v současné době na ústupu. Je metodou pro měření potřebné energie, aby bylo dosaženo téměř nulového rozdílu teplot mezi analyzovanou látkou

a inertním referenčním materiálem, přičemž oba vzorky jsou podrobeny stejnému teplotnímu režimu ve vytápěném (popřípadě chlazeném) prostředí zvoleným teplotním programem. Analýza zaznamenává všechny fyzikální nebo chemické změny v měřené látce, které jsou provázeny změnou entalpie a projevují se jako endotermní či exotermní reakce. DSC tedy měří příkon potřebný k udržení izotermních podmínek. Jsou používány dva typy systémů DSC, tzv. Heat-flux DSC a výkonově kompenzovaná DSC – obě jsou řazeny mezi skutečné kalorimetrické metody a umožňují získávat údaje o reakčním teple přímo z měření. [35]

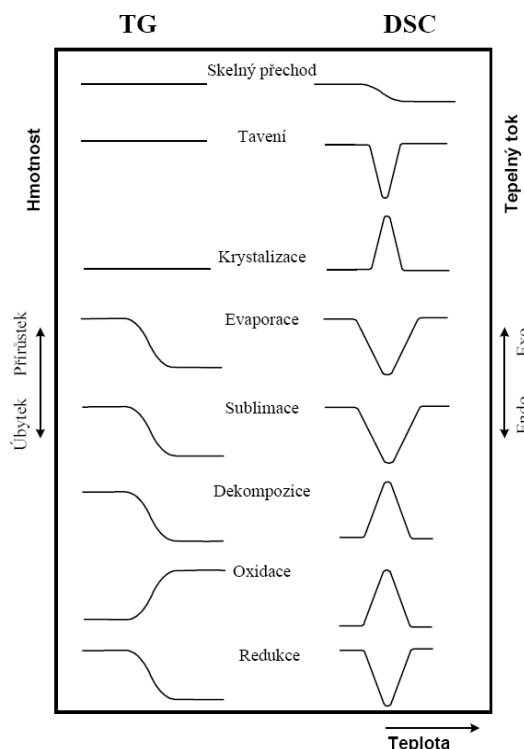


Obr. 27: Dva typy měřicích zařízení DSC: (a) výkonově kompenzované DSC a (b) heat-flux DSC. S – vzorek; R – referenční materiál. [36]

Diferenční skenovací analýzu lze použít například v těchto případech:

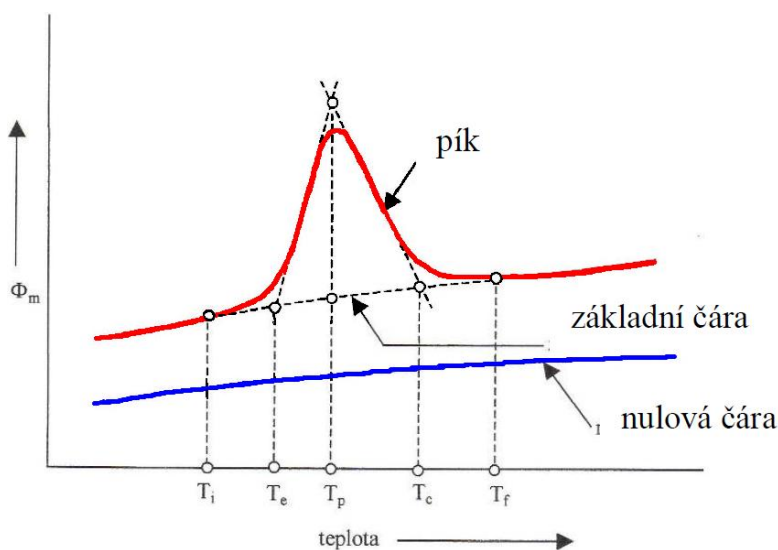
- analýza tepelné historie měřených vzorků
- zjišťování teploty skelného přechodu, teploty studené krystalizace, teploty tavení a tuhnutí
- analýza polymerových směsí a kopolymerů
- optimalizace vytvrzovacího režimu epoxidových pojiv a jiných polymerů
- určování oxidační stability
- a jiné. [35]

Prostřednictvím kombinace metod termogravimetrie a diferenční skenovací kalorimetrie (popřípadě DTA) a jejich výsledků je možné odhalit i reakce, jež se neprojevují změnou hmotnosti. Pro základní orientaci v reakcích zkoumaného vzorku při použití STA udává následující obrázek 2.18.



Obr. 28: Chování křivek TG a DSC při různých fyzikálně chemických procesech. [35]

U DSC je možné využít vysokou rychlost ohřevu (0,5 až 80 °C/min). Plocha píků je přímo úměrná teplu uvolněnému nebo spotřebovanému při reakci a výška píků je přímo úměrná rychlosti reakce. Významné body křivky jsou vyznačeny na Obr. 12. Nulová čára je křivka naměřená s prázdným zařízením, tj. bez vzorků a bez misek nebo bez vzorků s prázdnými miskami, T_i je počáteční teplota píku, T_e je extrapolovaný počátek, T_p je maximální teplota píku, T_c je extrapolovaný konec, T_f je teplota konce píku. [37]



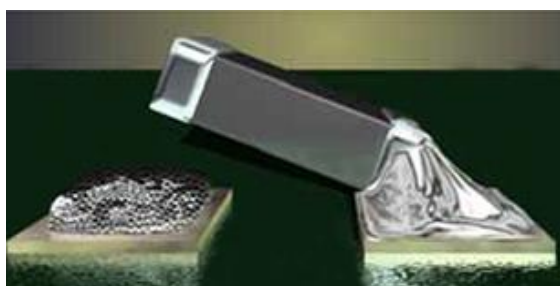
Obr. 29: Příklad křivky měřící metody DSC. [37]

Pokud u testované slitiny dochází k tání, jde o endotermický proces. Teplota materiálu zůstává konstantní navzdory kontinuálnímu ohřívání, dochází tedy k absorpci tepla do vzorku a přeměně této energie na tání. Na DSC křivce se tento jev projeví stejným tvarem píku jako krystalizace, avšak v opačném směru. Teplota tání (T_p) je deklarována jako vrchol píku a energie spotřebovaná na tání se získá integrací píku. Polydisperzní systémy (například polymery) mají na rozdíl od čistých monodisperzních systémů oblasti teplot tání a krystalizace, tj. celý vzorek neroztaje či nezkrystalizuje při jedné teplotě. [38]

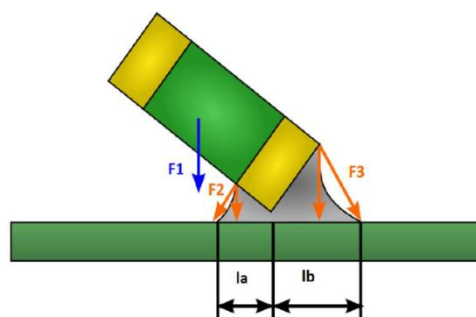
3.9 Tombstone efekt

Z výše popsaných fyzikálních pochodů může generované latentní teplo přispívat ke vzniku defektů při procesu pájení u osazených desek plošných spojů. Ohroženy jsou především SMD součástky, jejichž miniaturní rozměry jsou náchylné na výkyvy v technologických procesech. Jednou z výrobních vad, která má spojitost také s latentním teplem je takzvaný „Tombstoning“.

Tombstoning je jedním z mnoha běžných defektů, který souvisí se smáčivými silami v procesu pájení. Výraz označuje jednostranné nadzvednutí součástky a tím přerušení vodivého spojení. Vlivem smáčení povrchu a povrchového napětí pájecí slitiny může být součástka v průběhu přetavení na konci s menší působící silou utržena z pájecího bodu. Pájecí bod s větší působící silou překoná hmotnost součástky a menší působící sílu u druhého pájecího bodu. Výsledkem je jednostranné odpájení.



(a)



(b)

Obr. 30: (a) Příklad Tombstone efektu na součástce. (b) Síly působící na součástku při „Tombstoningu“; F_1 - ovlivněna pouze rozměry součástky a její hmotností, F_2 – smáčecí síla vyvolaná povrchovým napětím roztavené pájky v opačném směru než F_3 , její velikost ovlivňuje přesah l_a , F_3 – smáčecí síla vyvolaná povrchovým napětím roztavené pájky, její velikost ovlivňuje přesah l_b a způsobuje nadzvednutí součástky. [39], [40]

Vyšší výskyt tombstoningu je spojen s rostoucí miniaturizací používaných součástek (především součástek SMD). Jeho četnost roste také při nesprávně nastaveném přitlaku nebo nesprávným tiskem pájecí pasty v důsledku změny rozměrů DPS či v důsledku nerovnoměrného rozložení teplot při připájení. Přičemž nesprávné nanesení pájecí pasty, tedy její nerovnoměrné vrstvy na pájecích ploškách, má na tombstoning velmi výrazný vliv. Pokud je na jedné pájecí plošce nanášeno více pasty, je zde i více rozpouštědla, které je třeba odvést z tohoto ložiska a také větší množství slitiny, které je zapotřebí roztavit. Oba tyto parametry zapříčiní zpoždění okamžiku tavení, a pokud je zpoždění dostatečně velké, pak jednostranné nadzvednutí součástky je prakticky nevyhnutelné. Zpoždění okamžiku tavení a tedy vyšší četnost tohoto efektu je také svázána s návrhem desek plošných spojů (uzemnění a stínění je často realizováno většími plochami, které mohou sloužit jako chladič) nebo zvoleným procesem pájení (poloha a tvar některých komponent může způsobit zastínění některých oblastí DPS, zejména při pájení pomocí IR technologie). Toto vše zapříčiňuje nerovnoměrné zahřátí, které zvyšuje výskyt chyb při osazování součástek. [41]

Do výčtu příčin je třeba zahrnout i vliv latentního tepla s výše popsanými vlastnostmi. Jeho účinek se uplatní nejvíce při nerovnoměrném rozložení teplot v peci, nerovnoměrném množství pájecí slitiny či blízkosti pájených spojů, apod.

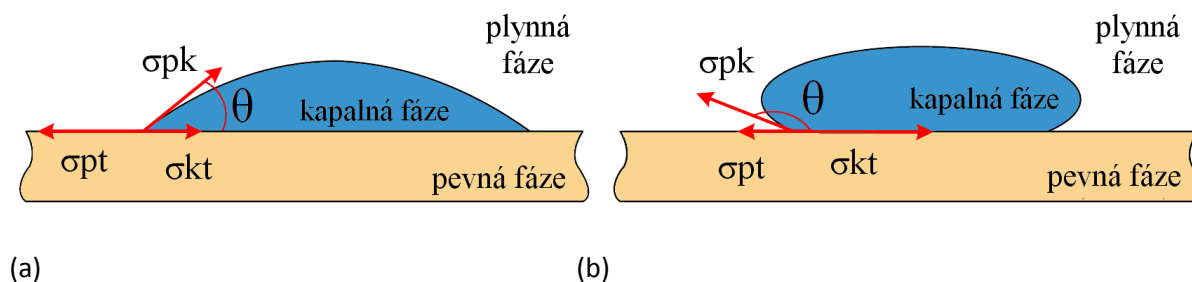
Nerovnoměrné rozložení teplot může být sníženo použitím vhodnějších metod pájení. Jedním z nich je technologie pájení v parách (VPS – Vapor Phase Soldering), avšak v tomto případě může kondenzující pájecí kapalina na DPS během fáze přetavení způsobit vztlakové působení síly na součástku, a tak podpořit vznik defektu - tombstoningu. Zcela jasný důvod vyššího výskytu tombstone efektu u technologie pájení v parách není stále zcela jasně probádán. [41]

3.10 Smáčivost slitiny a smáčecí síla

Pojem smáčivost je jedním z hlavních parametrů při pájení a je definován jako schopnost pájecí slitiny jednoznačně smočit kovový povrch za definovaný čas. Tedy pokud je povrchové napětí podkladu vyšší než povrchové napětí roztavené pájecí slitiny, může dojít k smočení pájeného povrchu slitinou (kapka pájecí pasty po smočení sníží svou výšku a zvětší svou plochu). Popíšeme-li situaci pomocí vektorů působících sil, je povrch smočen za podmínky, kdy vektor povrchového napětí rozhraní plynná fáze – pevná fáze (σ_{pt}) je vyšší



než vektor rozhraní kapalná fáze – pevná fáze (σ_{kt}). Situaci znázorňuje následující nákres.[41]



Obr. 31: Schematické znázornění povrchového napětí (rovnováha smáčivosti): (a) dobré smočení – ostrý úhel θ , (b) špatně smáčivý povrch – tupý úhel θ .

$$\sigma_{pt} = \sigma_{kt} + \sigma_{pk} \cdot \cos \theta, \quad (11)$$

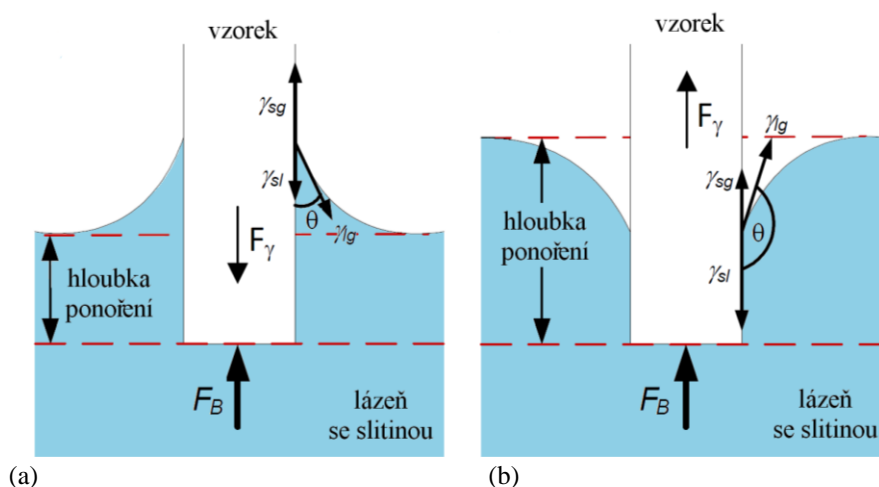
kde σ_{pt} je vektor povrchového napětí rozhraní plynná fáze – pevná fáze [Nm^{-1}], σ_{kt} je vektor povrchového napětí rozhraní kapalná fáze – pevná fáze [Nm^{-1}], σ_{pk} je vektor povrchového napětí rozhraní plynná fáze – kapalná fáze [Nm^{-1}] a θ je úhel smáčení mezi vektory σ_{kt} a σ_{pk} . Funkce $\cos \theta$ je také někdy označována jako součinitel smáčení. Tento vztah platí pouze tehdy, nedochází-li k žádným reakcím mezi tuhým podkladem a kapalnou fází pájecí slitiny. V praxi však tuto podmínku nelze dodržet, a proto děj vystihuje pouze přibližně. Aby byla smáčivost povrchu optimální, musí být úhel θ co možná nejmenší; toho je možné dosáhnout maximální velikostí vektoru σ_{pt} . Povrchová energie pájeného povrchu (pevné fáze) je snižována oxidy a nečistotami. Zde hraje nezastupitelnou roli tavidlo, jehož nejdůležitější funkcí je redukce oxidové vrstvy na povrchu pájeného předmětu, čímž se zvýší velikost vektoru σ_{pt} . Kvalita smáčení patří ke klíčovým parametrům v technologickém procesu elektrotechnické výroby, proto je velká část výzkumných prací zaměřena na hodnocení kvality smáčení v závislosti na řadě okolních faktorů. Pozornost prací byla věnována například vlivu atmosféry (nízká koncentrace kyslíku) Dušek a Urbánek (2006) [42], vlivu tepelné kapacity vzorků Dušek a kol. (2014) [43], jeho předehřevu nebo vlivu povrchu (různé povrchové úpravy) Harant a Steiner (2006) [44], jeho drsnosti Novák a Steiner (2009) [45] atd.

Proto se smáčivost téhož pájeného materiálu může u různých vzorků značně lišit v závislosti na stavu povrchu pájeného předmětu. Bylo zjištěno, že smáčivost povrchu kovů může být výrazně ovlivněna tenkými vrstvami oxidů, mastnotou a organickými nečistotami. Spojíme-li měděnou pájecí plošku na DPS s vývodem elektrické součástky, je třeba

rovnoměrné smočení pájecí slitiny obou ploch. Má-li součástka dva vývody a smáčení na obou stranách neprobíhá v průběhu přetavení rovnoměrně, vznikající povrchové napětí může zvednout druhou část komponenty (vývod s nižší smáčecí silou) – nastává „Tombstoning“ efekt. [9]

3.10.1 Meniskograf

Pro měření povrchového napětí pájecí slitiny existuje mnoho metod. Jednou z nich je měření smáčecí síly na základě metody smáčecích vah (měřicí zařízení je velmi často označováno jako meniskograf). Zařízení pracuje na principu velmi přesného měření sil, které působí na vzorek ponořený do kapaliny, obvykle roztavené pájecí slitiny. Výstupem měření je graf, který udává kontinuálně měřenou velikost síly v závislosti na čase. Je-li testovaný vzorek smáčivý, pak je vtahován do roztavené pájky. Pokud nevykazuje smáčivost, pak je vzorek vytlačován z lázně ven. Na následujícím schématu jsou popsány síly působící na smáčivý a nesmáčivý vzorek. [41]



Obr. 32: Schematické znázornění: (a) chování smáčivého vzorku, (b) chování nesmáčivého vzorku při ponoření do pájecí slitiny.

Testovaný vzorek je v průběhu doby měření vystaven vertikálním silám působících ve směru osy vzorku. Jsou jimi dvě základní – síla povrchového napětí a vztlaková síla.

$$F_{sm} = F_{\gamma} - F_B = P \cdot \gamma \cdot \cos\theta - \rho \cdot g \cdot V \quad (12)$$

kde: F_{sm} – měřená smáčecí síla (N)
 F_{γ} – síla povrchového napětí (N)
 F_B – vztlaková síla (N)
 P – obvod vzorku (m)

γ – povrchové napětí ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)

θ – styčný úhel na pevném povrchu ($^\circ$)

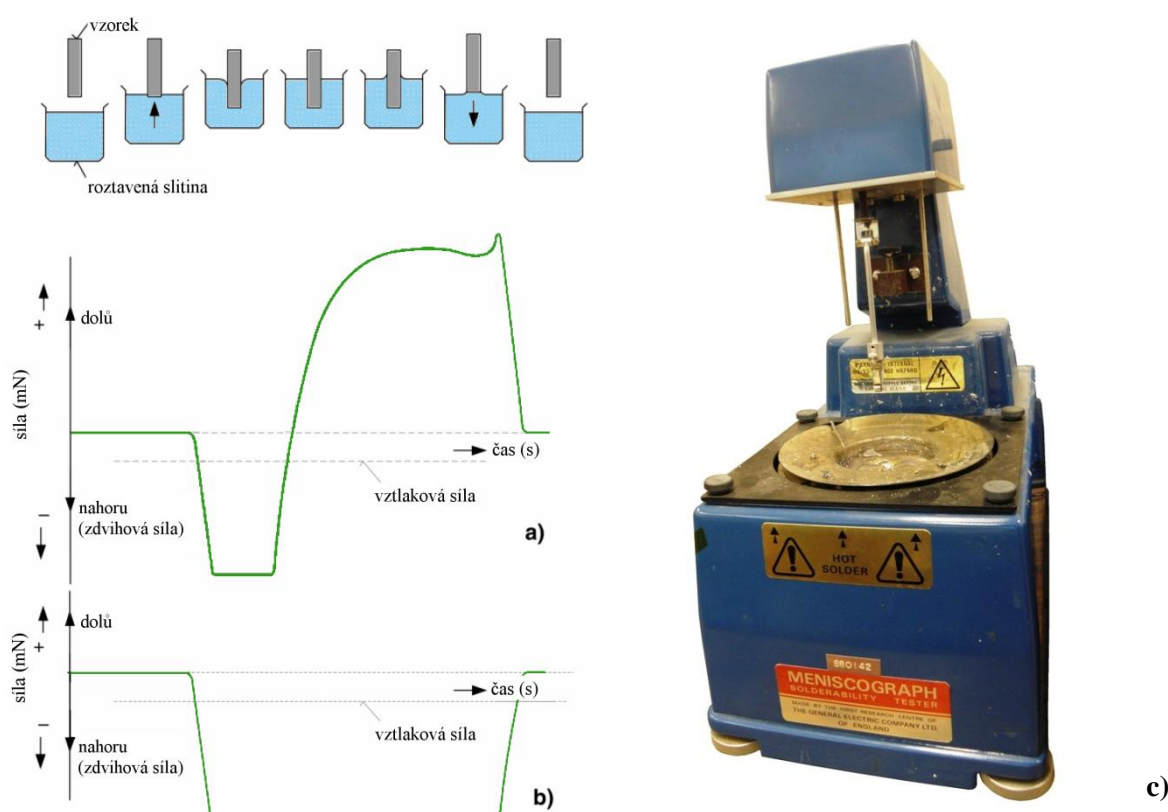
ρ – hustota pájecí slitiny ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

g – gravitační zrychlení ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ – podmínky ČR)

V – ponořený objem vzorku (m^3)

Vztlaková síla je dána hustotou pájecí slitiny, gravitačním zrychlením a ponořeným objemem zkoušeného vzorku. Proto je vztlaková síla považována za konstantní. Stejně tak obvod vzorku je považován za konstantní hodnotu, proto se velikost smáčecí síly odvíjí od aktuální hodnoty povrchového napětí a styčného úhlu. Pro výpočet hodnoty povrchového napětí γ je nutné znát změřenou smáčecí sílu F_{sm} a velikost styčného úhlu θ (je možno jej měřit optickou metodou). [46]

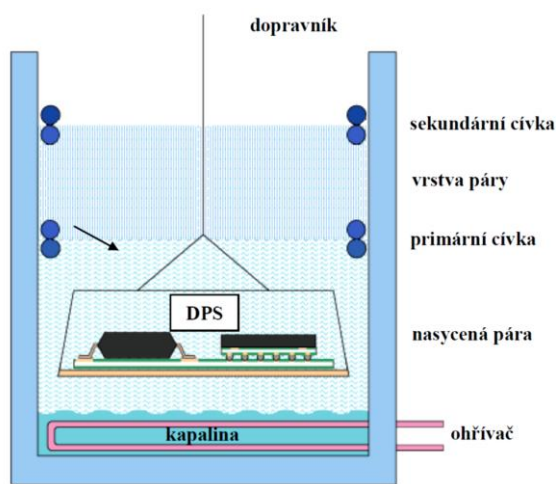
Při zahájení vlastního měření je hmotnost zkušební vzorku měřicím zařízením automaticky kompenzována; měření je proto nezávislé na hmotnosti měřeného vzorku. Princip měření pomocí smáčecí rovnováhy a charakter typických průběhů smáčivých sil je uveden na následujícím obrázku. [41], [46]



Obr. 33: Princip měření smáčivé síly ponořením měřeného vzorku do roztavené pájky – profil F_{sm} : (a) pro smáčivý, (b) pro nescháčivý vzorek; (c) meniskograf – měřicí aparatura.

3.11 Pájení v parách

Pájení v parách označovaná také jako VPS (Vapour Phase Soldering) je jedna z vyvíjejících se metod pájení v elektrotechnice, která byla poprvé představena roku 1974 Robertem Christianem Pfahlem a Hansem Hugem Ammannem. Tato nová technologie pájení pracující na principu kondenzace par byla vyvinuta jako možná alternativa za konvenční typy pájecích technologií. Jednou z výrazných předností tohoto principu je velmi účinný přenos tepla, aniž by došlo k přehřívání součástky. Zároveň je tak možné v rámci teplotního profilu zkrátit dobu ohřevu pájené součástky. Také vzhledem k vysoké hustotě plynné fáze pracovní kapaliny, která kondenzuje na DPS, je pájený spoj chráněn před oxidací. Tenká vrstva zkondenzované tekutiny na povrchu spoje vytlačuje přítomný kyslík, díky čemuž pájení probíhá v inertní atmosféře. Technologie pájení v parách má i své negativní vlastnosti. Krammer a Garami (2010) uvedli, že velmi účinný přenos tepla a tedy i ohřev pájené DPS může způsobit potíže v důsledku rychlých teplotních změn, které vedou k prasklinám nebo tvorbě dutin („voidů“) uvnitř pájených spojů, jak potvrzuje Villain a kol. (2000). [47], [48], [49], [50]



(a) (b)
Obr. 34: Technologie pájení v parách: (a) příklad malého experimentálního zařízení, (b) schematické znázornění principu pájení v parách. [51]

V průběhu let došlo ke změně pracovní kapaliny. Zpočátku se používala organická sloučenina fluorochlorouhlovodík (CFC) patřící do skupiny freonů. S ohledem na šetrný přístup k životnímu prostředí byla tato sloučenina postupně nahrazena tekutinou známou pod označením Galden. Jakmile je deska plošného spoje vložena do par tohoto pracovního média (bod varu kapaliny musí být nad teplotou přetavení pájecí slitiny) dochází na desce ke kondenzaci par. Kondenzací sice narůstá rychlost přenosu tepla, ale také se mění povrchové

napětí, které ovlivňuje velikost smáčecí síly roztavené pájky; možným důsledkem je nárůst tombstoningu, jak uvádí Dušek a kol. (2013). Prostředek pro přenos tepla je zcela inertní a netoxický. Ohřev celé DPS uvnitř komory probíhá téměř rovnoměrně a teplotní profil ohřevu při dodávané energii má lineární charakter, jak uvádí Plotog a kol. (2010). Pak je však obtížné dodržet teplotní profil použité pájecí pasty, který doporučuje výrobce. Géczy a kol. (2011) prokázal, že teplotnímu profilu se lze přiblížit pouze postupným ponořením DPS do par pracovní kapaliny. [52], [53], [48]



Obr. 35: Pracovní kapalina Galden (PFPE - perfluorpolyether).

Pracovním médiem v této technologii je čirá kapalina známá pod označením Galden. Jde o specifický výrobek tvořený z perflorpolyetherové sloučeniny (PFPE), jehož teplota varu může být zvolena v širokém rozmezí hodnot od 55 °C do 270 °C; vhodný typ je volen podle bodu tání použité pájecí slitiny. Látka také disponuje vyšší hustotou (od 1,65 do 1,85 g/cm³), díky níž se při kondenzaci na pájeném spoji snadno vytlačuje atmosférický kyslík z oblasti pájení a tímto způsobem je zabraňováno oxidaci. Vyjmutím desky plošného spoje z pájecí komory nezůstávají na jejím povrchu po odpaření Galdenu žádné nečistoty. [54]

Technologickou nevýhodou procesu pájení v parách je nárůst výskytu některých specifických defektů, jakými jsou například tombstoning SMD součástek nebo vzlínání u olovnatých komponent, jak popisuje Dušek a kol. (2013) a Plotog a kol. (2008). Proto se oproti ostatním technologiím (pájení horkou konvekcí, pájení IR zářením) projevuje u všech systémů na principu ohřevu párou výskyt nadzvedávání pájených komponent mnohem častěji. Tento jev vychází ze samé podstaty procesu. Pára přenáší tepelnou energii na povrch desky prostřednictvím kondenzace – změně fázového stavu z plynné fáze na kapalnou. Willis (n. d.) uvádí, že vytvořený kapalný film na povrchu DPS může následně interagovat s prvky na jejím povrchu a způsobit jejich pohyb. [55], [56]

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Proces přetavení je důležitou a nedílnou součástí při pájení elektrických součástek. Avšak právě přetavení pájecí slitiny přispívá k nejrůznějším chybám, jako je například „Tombstone efekt“, tvorba dutin – „voidů“, rozstříkávání tavidla, tzv. odsmáčení – „dewetting“ a růst tenkých krystalických útvarů z povrchu – tzv. „whiskers“. Tyto vady jsou způsobeny v převážné míře špatnou kompatibilitou mezi použitými materiály nebo nevhodně zvoleným teplotním profilem. [57] Avšak rozsah každé ze zmíněných problematik pájení je nezměrný, proto uskutečněná měření se snaží přiblížit vlastnosti některých z nich a simulovat chování při pájení na desce plošného spoje.

4.1 Latentní teplo

Možná než následek je dobré poodhrnout roušku zastiňující možnou příčinu některých chyb jdoucích ruku v ruce s použitými materiály a teplotním profilem. Schopnost pájecí slitiny uvolňovat ze sebe sama velké množství energie vedoucí při ochlazování k opětovné změně skupenství na kapalné je mimořádný jev, který v elektrotechnickém průmyslu zaznamenává s rostoucí miniaturizací součástek a rychlostí výroby stále větší význam. Je-li spoj v blízkém prostoru osamocený, energetické šíření do prostoru nemá žádný další dopad. Ale pokud je v blízkém okolí podobných spojů více a jsou-li mezi sebou propojeny pomocí vodivých cest či součástek, pak již podrobnější pohled na tento jev má smysl.

Je však nutno postupovat od začátku, a proto se pro nastínění situace podíváme, jak se chová jeden osamocený pájený spoj olovnaté eutektické pájecí slitiny.

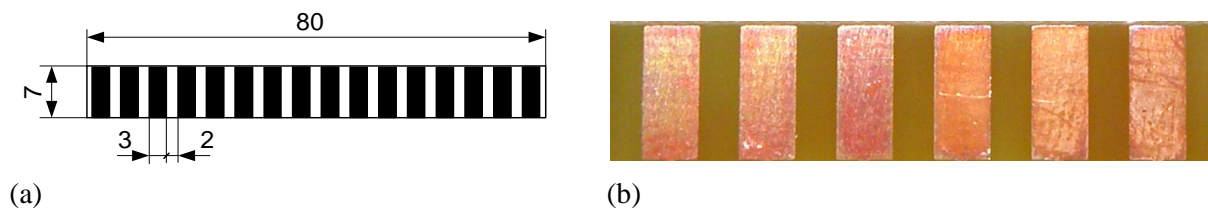
4.1.1 Osamocený pájený spoj – průběh latentního tepla

4.1.1.1 Konstrukce měřicí soustavy

Ideou měření bylo přiblížit se reálným podmínkám panujícím při procesu přetavení na desce plošného spoje a zároveň mít měřicí vzorek natolik odolný, aby bylo možno s jeho pomocí provést více měření bez výraznějších změn. Takovéto předpoklady u prvních měření



splnila jednovrstvá deska plošného spoje tloušťky 1,5 mm s měděnými ploškami o tloušťce naválcované mědi 30 μ m.

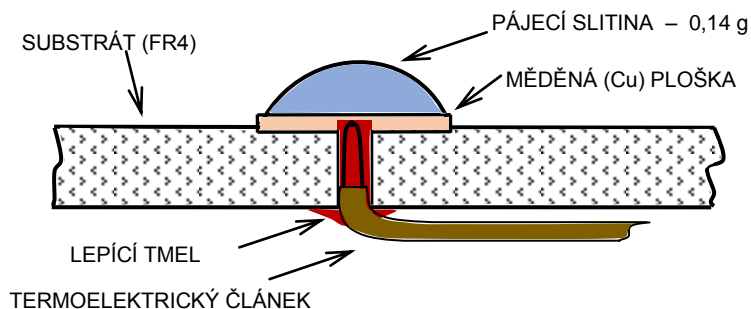


Obr. 36: Znárodnění měřicí desky: (a) schematické znázornění celé desky, (b) detail desky.

Na pájecí plošku o rozměrech 3x7 mm byla umístěna pájecí slitina o hmotnosti 140 mg; dostatečné množství na to, aby pájecí plošku na celém jejím povrchu pájka smočila a zároveň se po přetavení neroztékala mimo měděnou plošku.

Hmotnost všech použitých vzorků byla odvažována na laboratorních analytických vahách Mettler Toledo typ AG 245s s maximálním zatížením do 41 g s možností čitelnosti na 0,01 mg.

S rostoucím objemem pájecí slitiny roste množství absorbovaného a uvolněného latentního tepla při změně skupenství. Snáze se tak snímá tepelná změna, jejíž záznam je třeba provést na nejbližším možném místě. Jako senzor teploty byl pro své tepelné a mechanické vlastnosti vybrán termoelektrický článek typu „K“, jehož teplotní charakteristika i rozsah jsou pro danou situaci vyhovující. Vzhledem k potřebě vysoké rychlosti odezvy a malé tepelné kapacity byl vytipován termoelektrický článek s vodiči o průměru 0,12 mm svařenými natupo. Ideálním umístěním měřicího spoje je střed nanesené pájecí slitiny na měděné pájecí plošce. Tento předpoklad však není zcela možné fyzicky realizovat. Proto bylo využito tepelných vlastností mědi (tepelná vodivost 386 W·m⁻¹·K⁻¹). Pod měřený bod (pod pájecí plošku) byl čelní frézou o průměru 1 mm frézován otvor do substrátu FR4, a to až na spodní část měděné plošky tak, aby byl povrch zbaven všech nečistot. Do otvoru kolmo k měděné plošce byl vsunut měřicí konec termoelektrického článku, jehož fixaci zajistil silikový lepicí tmel s teplotní odolností do 300 °C. Schematicky je tato situace znázorněna na obrázku 37.



Obr. 37: Schematické uspořádání měřicího přípravku.

K měřicímu přípravku byly z obou stran připevněny opory, aby byl vzorek stabilní a mohl procházet třízónovou horkovzdušnou průběžnou pecí typu MISTRAL 260. Teplotní profil nastaven dle specifikace výrobce pro daný typ pájecí slitiny.

Změna teploty slitiny během průchodu pecí není nikterak rychlá; postačí, je-li odečet hodnot s periodou 1 – 2 s. A to až do chvíle fázové přeměny z kapalné do pevné fáze, kde přechodný jev začátku uvolnění latentního tepla trvá v jednotkách sekund. Proto perioda odečtu musí být alespoň o řád nižší, aby byl přechodný stav zaznamenán. Toto splnil automatický sedmikanálový datalogger KIC Explorer zaznamenávající data v reálném čase, z kterých online vytvářel grafický náhled průběhu.



(a)

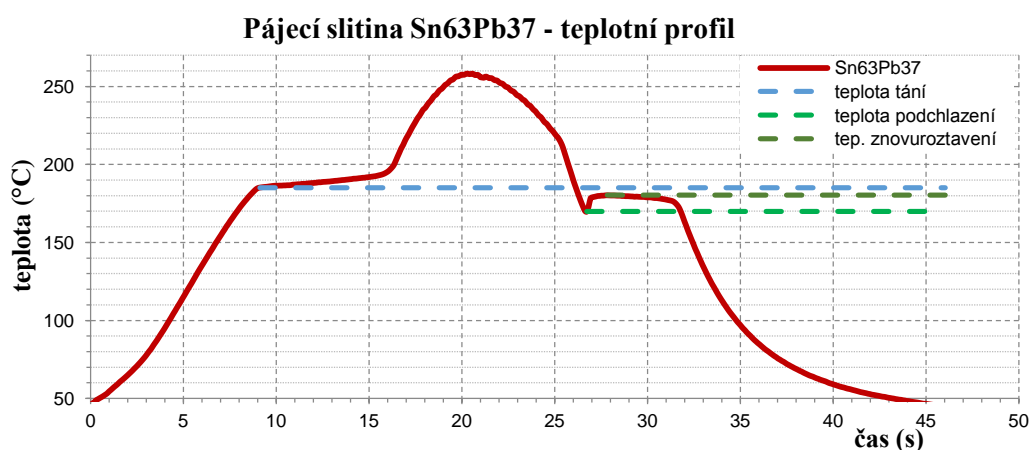


(b)

Obr. 38: Použité technologie při měření: (a) průběžná horkovzdušná pec MISTRAL 260 pro ohřev vzorků, (b) záznam teplotního profilu - profilometr typu KIC ON BOARD – Explorer a softwaru KIC 2000, vision 2.6.0.0.

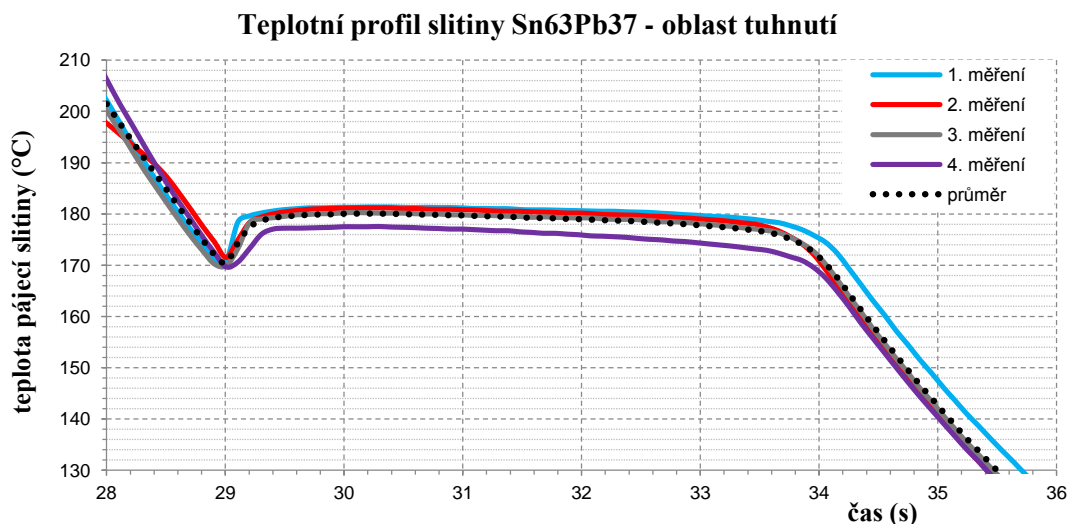
4.1.1.2 Průběh měření - teplotní profily

Projev latentního tepla v průběhu cyklu pájení se projevuje ve dvou oblastech, kdy dochází ke změně skupenství. Nejprve se objevuje při změně z pevného na kapalné skupenství; v této oblasti struktura teplo absorbuje. V druhé fázi jej uvolní a struktura přechází z kapané fáze do fáze pevné. Z hlediska širšího pohledu na spolehlivost pájení během výroby se mnohem více uplatňuje druhá fáze (tuhnutí pájecí slitiny), při níž se teplo uvolňuje, ale jak referenční měření na pájecí slitině Sn63Pb37 ukáže, není zcela stabilní.



Obr. 39: Celý teplotní profil eutektické pájecí slitiny Sn63Pb37.

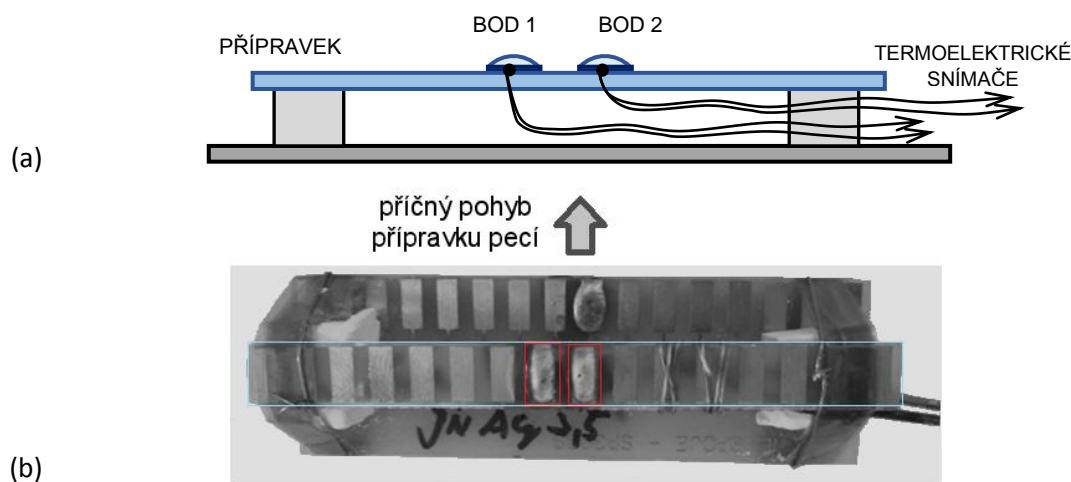
Zaměříme-li se na druhou část teplotního profilu, kdy teplota slitiny klesá až do okamžiku změny fáze (z kapalné do pevné), která je nižší než teplota tání, dojde k takzvanému podchlazení slitiny. Tato teplota však při změně skupenství nezůstává konstantní, a opět narůstá. Z průměru čtyř měření při poklesu teploty 22 °C/s lze naměřit nárůst teploty při opětovném ohřevu slitiny nad 10 °C , viz detail teplotního profilu (chladnutí) na Obr. 40.



Obr. 40: Výsledek naměřeného teplotního profilu slitiny Sn63Pb37 při chladnutí - uvolnění latentního tepla do prostoru.

4.1.2 Dva samostatné body na desce – průběh latentního tepla

Umístíme-li na desku plošného spoje (Obr. 41) dva nezávislé pájecí body vedle sebe, které nejsou propojeny, je možno pozorovat vzájemný vliv mezi nimi. Na obě pájecí plochy byla nanášena pájecí slitina o hmotnosti 140 mg. Plošky disponují rozměrem stejným jako v předchozím případě a pod oběma je umístěn termoelektrický snímač.



Obr. 41: Přípravek pro měření dvou samostatných pájecích bodů: (a) schéma uspořádání, (b) vzorek.

Pro potřeby tohoto experimentu byly vybrány tři běžně v průmyslu užívané bezolovnaté pájecí slitiny, a to: slitina cínu a mědi - 99,3Sn0,7Cu, cínu a stříbra - 96,5Sn3,5Ag a tříslušková - SAC 305 (96,5Sn3Ag0,5Cu). Před prvním měřením každé slitiny bylo provedeno takzvané formování vzorků. Připravené a odvážené množství pájecí pasty bylo

naneseno na měděnou plošku; prvním průjezdem pecí byla pasta slita v jeden celek, kdy slitina smočila podkladovou měděnou plošku. Poté došlo k očištění pájených míst od zbytků tavidla, aby neovlivňovaly měření. Ze známého úbytku hmotnosti při přetavení bylo vždy na začátku naváženo více tak, aby se výsledek blížil 140 mg. Testovaný vzorek byl vystaven působení teplotního profilu v rozsahu doporučeném výrobcem. Vzorek byl vkládán příčně na pásový dopravník průběžné horkovzdušné pece z důvodu minimalizace rozdílu teplot testovaných bodů. Každá ze tří sekcí pece má délku 30 centimetrů a minimální rychlost posuvu dopravníku je 15 cm/min, z toho důvodu zde vzniká velký gradient teplot na vzorku a tedy i náchylnost k jejich nerovnoměrnému zahřátí. Proto musely být vzorky vždy precizně vycentrovány, aby byla odchylka minimální. Ale i tak je vždy nutné očekávat malý teplotní rozdíl mezi oběma body, a bude tomu tak i u velkých pecí. Díky tomu vždy jeden z bodů začne tuhnout o zlomek vteřiny dříve.

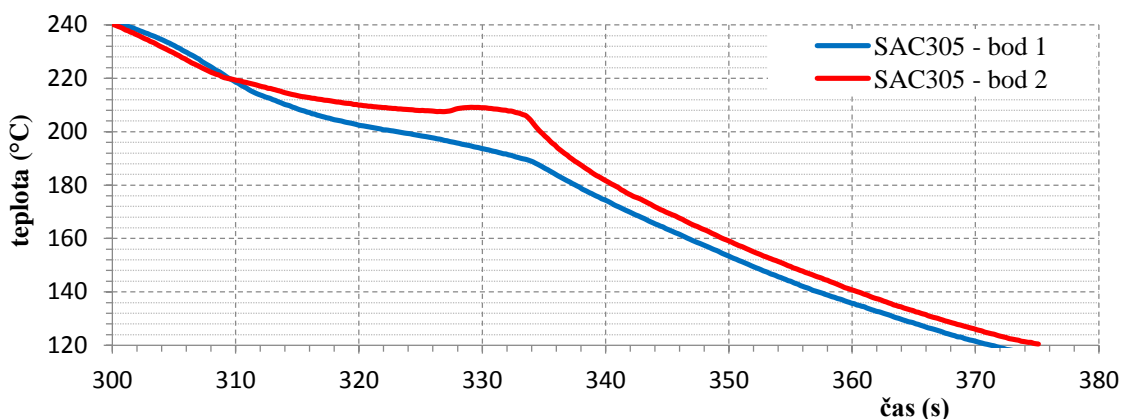
Jednotlivé zóny postupně ohřívaly testovaný vzorek až na teplotu jeho přetavení. Nastavení úrovní bylo:

1. zóna - 150 °C s rychlostí ohřevu vzorku cca 0,65 °C/s (25 °C - 150 °C),
2. zóna - 200 °C s rychlostí ohřevu vzorku cca 0,27 °C/s (150 °C - 200 °C),
3. zóna - 250 °C s rychlostí ohřevu vzorku cca 0,55 °C/s (200 °C - 255 °C),

teplota ochlazování – konstantní teplota 25 °C (zamezení nuceného chlazení krytem).

Tepelná energie se šíří vedením přes nosný materiál FR4, i když nejsou oba body nijak přímo vodivě propojeny. Materiál FR4 má výrazně nižší tepelnou vodivost, proto vliv tepelné energie šířící se ze sousedního bodu působí se značným zpožděním, a to buď ještě v oblasti fázové změny, kdy součet energií z původního a sousedního bodu lokálně zvýší teplotu (tak jak to zobrazuje následující graf), nebo prodlouží dobu trvání oblasti fázové přeměny. Dojde-li k nárůstu teploty, slitina může opět krátkodobě přejít do kapalné fáze. Pokud tato situace nastane u pájené SMD součástky, tak se díky rozdílnému poměru působících sil může vývod součástky nadzvednout (vznik „tombstone efektu“) a nastane chyba při výrobě.



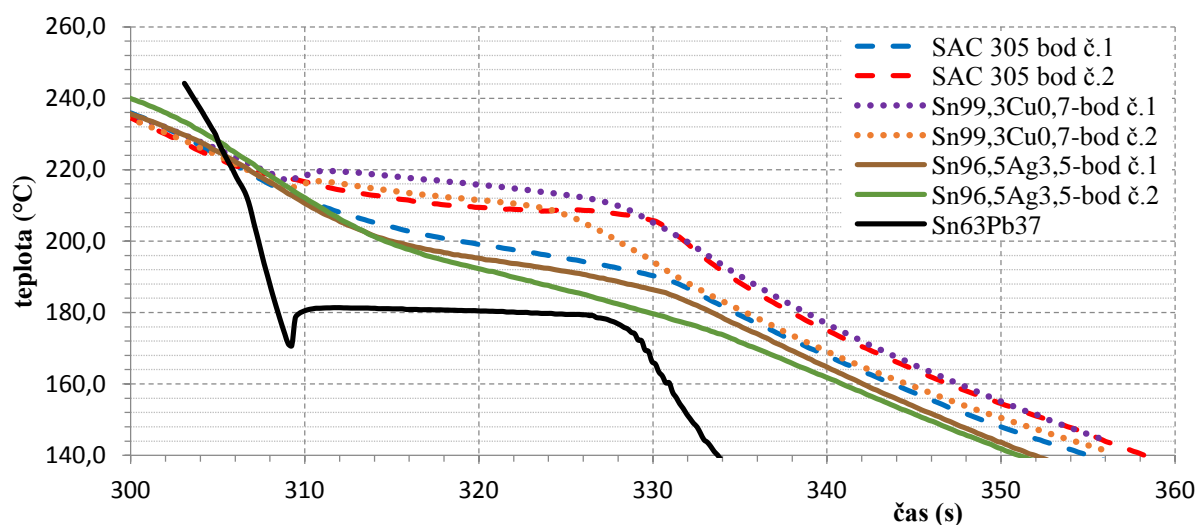


Obr. 42: Teplotní profil dvou samostatných pájecích bodů bezolovnaté pájecí slitiny SAC 305 – působení generovaného latentního tepla mezi body.

Výsledný tvar teplotní křivky při fázové změně výrazně závisí na složení pájecí slitiny. Základní složkou bývá cín, jehož tepelná vodivost ($66,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) v porovnání s mědí a stříbrem není nikterak vysoká (tepelné vodivosti mědi a cínu dosahují okolo šestinásobku vodivosti cínu). Olovo vůči cínu je na tom ještě o téměř polovinu hůře ($35,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Proto i jejich jednotky procent obsažené ve slitině dokážou změnit charakter uvolněné energie, jak dokládá následující graf. Čím vyšší je procentuální zastoupení měděné a hlavně stříbrné složky, tím menší je projev podchlazení slitiny při fázové přeměně. Nejvýrazněji se projevuje bezolovnatá slitina s minimálním zastoupením mědi Sn99,3Cu0,7. Porovnáme-li ji však s klasickou olovnatou Sn63Pb37 slitinou, je oblast podchlazení mnohem výraznější. Tepelný odpor slitiny brání odvodu přebytečné energie do okolí a navyšuje teplotu slitiny.

Podíváme-li se na oba body slitiny zvlášť, je projev u každého typu slitiny obdobný. Vždy jeden bod z každé slitiny zahájí změnu fáze o zlomek vteřiny dříve. Uvolněná energie z jednoho bodu se mimo jiné šíří do sousedního bodu a tím ho udržuje déle na vyšší teplotě. Proto i sousedství dvou bodů bez přímého propojení má vliv na teplotní profil v daném místě a tedy i na průběh přetavení součástky.

Porovnání teplotních profilů pájecích slitin



Obr. 43: Porovnání průměrných teplotních profilů dvou nepropojených pájecích bodů bezolovnatých pájecích slitin (SAC 305, Sn99,3Cu0,7 a Sn96,5Ag3,5) s olovnatou pájecí slitinou Sn63Pb37 – zobrazena fázová změna z kapalného do pevného skupenství.

4.1.3 Rozložení teplot uvnitř pájeného spoje

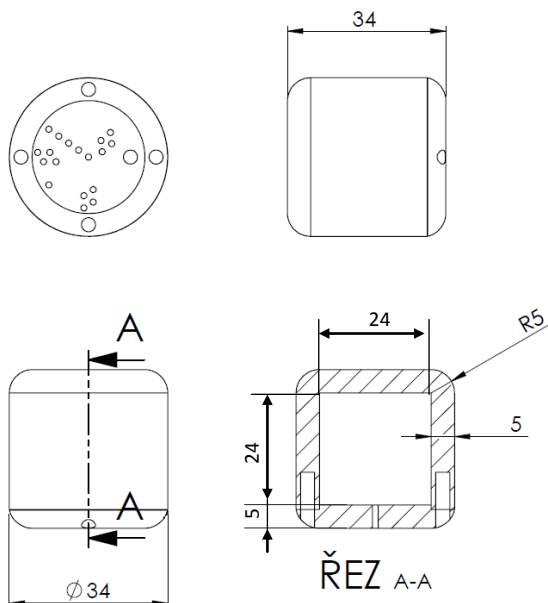
Výše zobrazené průběhy vykreslují výsledné tepelné chování pájeného spoje při fázové změně. Nic však neříkají o tom, jak se teplota rozkládá uvnitř samotného bodu. Pokud by tato skutečnost byla známa, bylo by snazší představit si pochody způsobující výsledný efekt.

4.1.3.1 Technické provedení měřícího přípravku

Na výrobu jednoho elektricky vodivého spoje pomocí pájecí slitiny pro technologii SMT jsou zapotřebí jednotky až desítky mg hmoty. Z hlediska objemu jde o nepatrné množství. Aby bylo možno nahlédnout do jeho nitra stávající dostupnou technikou, je nutno tuto nepatrnou kapku mírně zidealizovat a výrazně zvětšit. Tvar pájeného spoje byl co nejvíce zjednodušen do tvaru, který je s ohledem na rozkládání teplot symetrický. Ve vrcholném ideálu by slitina v prostoru zaujímal objem symetrický vůči středu, tedy kouli. Avšak realizovat technické řešení přípravku uzavírající slitinu tvaru koule v kouli není zcela jednoduché. Proto byl zvolen tvar osově symetrický vůči ose. Válec o poloměru 12 mm a výšce 24 mm díky svým rozměrům umožnil základní měření. Rozměry byly zvoleny na základě velikosti sond. Materiál přípravku byl volen tak, aby byl k roztavené slitině netečný a

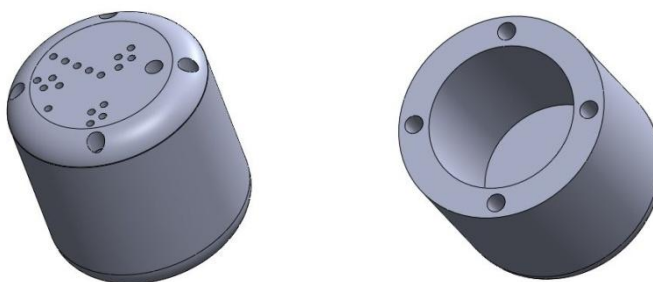


neovlivňoval měření. Stala se jím nerezavějící ocel AISI 321 (DIN 1.4541) s odolností do vysokých teplot.



Obr. 44: Nákres zkušebního zařízení pro měření teplotních průběhů uvnitř pájecí slitiny.

Nádoba byla navržena tak, aby bylo možno snáze měnit obsah; proto je jedna z podstav válce odnímatelná, uchycená čtyřmi metrickými šrouby o průměru 3 mm. Do víka jsou dále vyhloubeny otvory o průměru 1,3 mm pro vkládání měřicích sond a otvor o průměru 4 mm pro vyrovnávání rozdílů roztažnosti při roztavení slitiny. Tloušťka stěny malého kontejneru je 5 mm. Šrouby pro upevnění víka jsou rovněž z nerezavějící oceli.

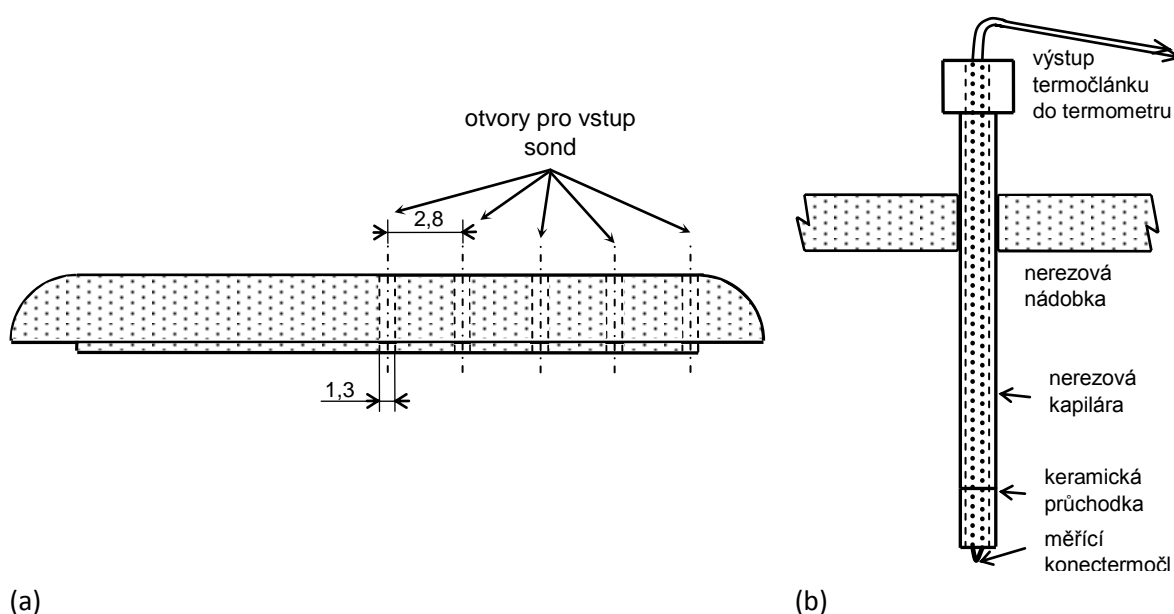


Obr. 45: Trojrozměrný model kontejneru pro měření pájecí slitiny.

Vyvrtné otvory ve víku kontejneru spolehlivě slouží jako vodící prvek pro usazení sond. Lze jimi zcela spolehlivě dodržovat vzdálenost sond od středu, rovnoběžnost se stěnou válce a hloubku ponoru. Víko ve své spodní části dosedající na kontejner není zcela rovné, je opatřeno milimetrovým přesahem. Roztavená pájecí slitina je k povrchu nerezové nádoby netečná, nesmáčí její povrch; a tak víko při dosednutí na kontejner zdeformuje vypouklý povrch pájecí slitiny a vytlačí přebytečný vzduch. Vytěsněním přebytečného vzduchu je

pájecí slitina ve všech místech v přímém kontaktu se stěnami, slitina v kontejneru tak může být rovnoměrně ohřívána i chlazena.

Plášť sondy pro měření teplotních pochodů uvnitř kontejneru je tvořen nerezavějící ocelovou kapilárou o průměru 1,2 mm zasunutou do víka kontejneru. V horní části navazuje na plastovou vývodku sloužící k upevnění vstupujícího termočlánku. V dolní části navazuje na 5 mm dlouhou a 1,2 mm širokou keramickou průchodku pro snížení teplotně-vodivostního vlivu nerezové kapiláry v místě měření termočlánku. Celou soustavou je protažen termoelektrický článek typu K o průměru měřicího drátu 0,12 mm s izolací ze skleněných vláken.



(a)

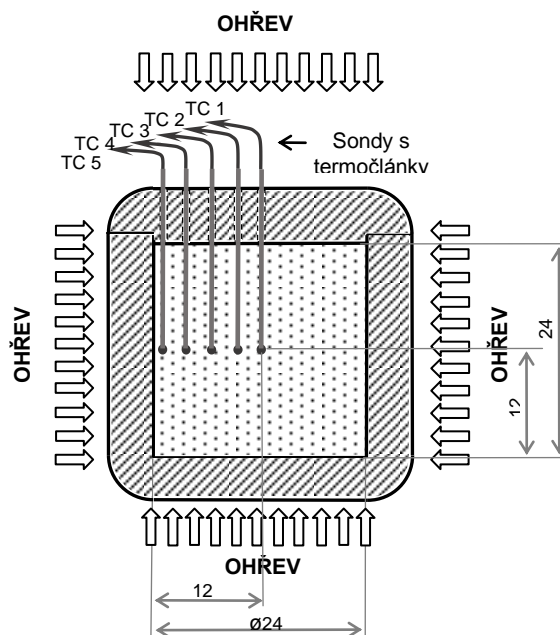
(b)

Obr. 46: Komponenty měřicího kontejneru: (a) řez víkem kontejneru, (b) měřící sonda procházející víkem kontejneru.

Hloubka sond byla nastavena tak, aby měřící konec termočlánku dosahoval středu, tedy 12 mm od víka kontejneru. Vložení sond bylo umožněno až po zahřátí kontejneru nad teplotu tání slitiny a při téže teplotě se uzavřelo víko. Po dotažení jisticích šroubů byl přípravek připraven k měření.

Ohřev komory je nutno provádět co nejrovnoměrněji ze všech stran. K homogenizaci ohřevu napomáhá 5 mm silná kovová stěna nádoby. Z hlediska dostupných možností byl kontejner zahříván ponořením do roztavené pájecí slitiny ohřívané ve větší nádobě. Ochlazování probíhalo pasivně při konstantní teplotě okolí 23 °C a v bezprůvanových podmínkách. Pouze u nízkotavitelné slitiny Sn42Bi58 bylo možno využít parametrů

programovatelných klimatických komor, s jejichž pomocí se dal realizovat nejen plynulý ohřev, ale také plynulé ochlazování kontejneru.



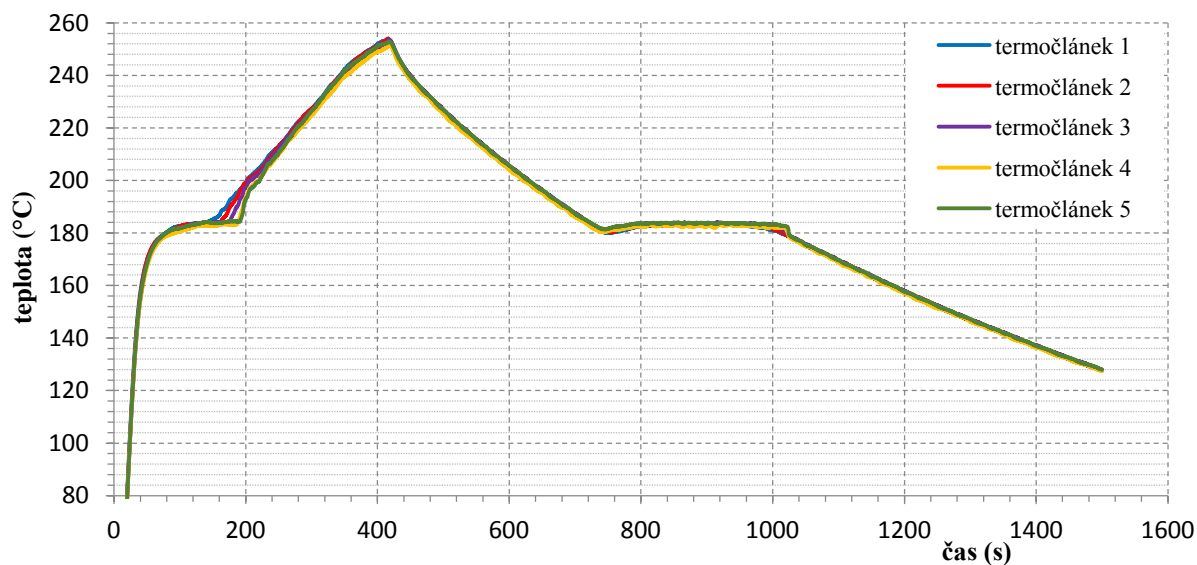
Obr. 47: Schematické uspořádání měřicí sestavy při ohřevu.

4.1.3.2 Vlastní měření průběhů teplot

V průběhu tepelného cyklu tání a tuhnutí prochází slitina mnoha vnitřními změnami. Čím více základních složek utváří výslednou pájku, tím narůstá složitost celého systému a nehomogenita chování. Pokud bychom mohli v objemu pájecí slitiny sledovat konkrétní ideální bod, s největší pravděpodobností by bylo možné zachytit velmi rychlé teplotní změny, které se odehrávají na rozhraní základních částic. Také by bylo možno sledovat vznikající zárodky nukleačních center, které do svého okolí uvolňují energii z fázové přeměny a ve svém bezprostředním okolí prudce mění teplotu, která se postupně šíří do prostoru. Průběh teploty může velmi dobře reflektovat podobné děje. Avšak hůře se realizuje ideální sonda nekonečně malých rozměrů. Reálné sondy konečných rozměrů již integrují mnoho takovýchto změn ve svém okolí, rychlé drobné výkyvy se stírají a výsledná křivka se vyhlazuje. Pokud je ale intenzita reakce prostředí vyšší, bude na to reagovat i výsledná křivka. Těmito oblastmi jsou především tání a tuhnutí slitiny; také lze zaznamenat přítomnost intermetalické fáze ve slitině (blíže popsáno v kapitole 4.3.2. „Šíření latentního tepla přes součástku mezi pájecími body“). Nejvhodnějším umístěním měřicí sondy je uprostřed měřeného objektu. Pokud budeme uvažovat reálný pájený spoj, bude dobré znát krom středu spoje i chování na jeho

povrchu a v mezilehlých bodech. Tedy hrubé rozložení teplot v objemu pájeného spoje v čase. Grafy obsažené v této kapitole jsou záznamem pěti termočlánkových sond umístěných od středu k okraji měřicího kontejneru (termočlánek 1 – TČ1 měří při okraji kovového kontejneru a termočlánek 5 – TČ5 měří v jeho středu). Pro experiment byla zvolena jako základní slitina cín-olovnatá pájka Sn-Pb (Sn63Pb37) a bezolovnaté pájecí slitiny SAC 305 (Sn96,5Ag3Cu0,5), Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) a Sn-Bi (58Bi42Sn).

Teplotní cyklus olovnaté pájecí slitiny realizovaný na aparatuře měřicího kontejneru se od reálného spoje výrazně odlišuje především v použitém množství zkoumaného materiálu. Tomu odpovídají i doby trvání sledovaných oblastí teplotního profilu. Příkladem může být teplotní profil cín-olovnaté pájecí slitiny. Skládá se ze dvou hlavních částí, fáze ohřevu a fáze ochlazování, jejichž rozhraním je vrchol charakteristiky (cca 252 °C). V obou fázích při vzrůstu a poklesu teploty je výrazná stagnace křivky. Při ohřevu slitiny (rychlost 4,5 °C/s) jde o tání a při poklesu (rychlost ochlazování 0,2 °C/s) o tuhnutí. Je zde patrná teplotní hystereze; tání probíhá při vyšší teplotě 183 °C, naopak solidifikace při nižší teplotě 181 °C (v oblasti podchlazení). Ve většině dostupné literatury jsou tyto oblasti brány jako naprosto konstantní, teplota se v obou oblastech zastaví a probíhá fázová přeměna. Ovšem, není tomu zcela tak, jak se mnohdy píše. Obě oblasti v sobě odrážejí vlastnosti a děje, které probíhají na pozadí.

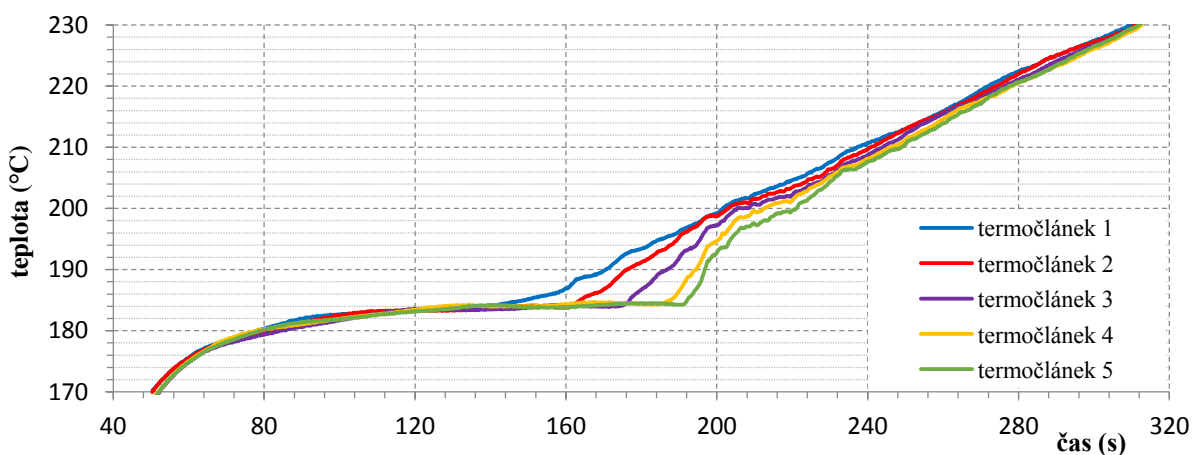


Obr. 48: Teplotní profil pájecí slitiny Sn63Pb37 měřený v nerezovém kontejneru (1. cyklus).

Začneme-li rovnoměrně ohřívat měřicí kontejner, teplota slitiny velmi rychle reaguje na teplotu okolí a rovnoměrně se ohřívá v celém svém objemu. Nárůst teploty, v oblasti blízké bodu tání, rychle klesá a blíží se k nule. Slitina spotřebovává energii na skupenskou přeměnu. V okamžiku roztavení se jednotlivé teplotní křivky začínají větvit. Oblast okolo



každé sondy (v ideálním případě válcová rovina zanedbatelné tloušťky o poloměru r) spotřebovává teplo, dokud nedojde k fázové změně; tím brání přísunu potřebné energie k další oblasti ve směru k středové ose kontejneru. Proto další měřící sonda (termočlánek 2) zaznamená ve své blízkosti opětovný nárůst teploty slitiny déle než v předchozím případě. Intervaly mezi jednotlivými sondami se postupně ve směru od kraje (termočlánek 1) ke středu (termočlánek 5) zkracují, neboť směrem ke středu klesá měřený objem slitiny, která mění svoji fázi. Po roztavení celého objemu teplota ve všech měřených bodech opět narůstá; křivky se díky setrvačnosti slitiny pomalu přibližují k sobě. I zde by měla být křivka hladká, ovšem žádná slitina není zcela homogenní.



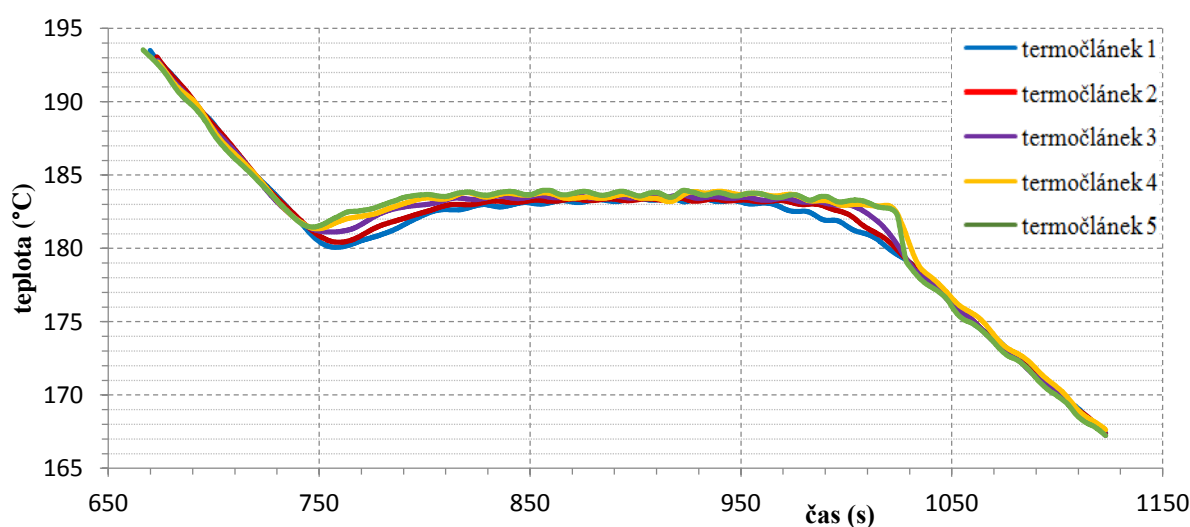
Obr. 49: Průběh teplot pájecí slitiny Sn63Pb37 v oblasti tání (1. cyklus).

Teplotní křivky měřených oblastí po odeznění přechodného jevu se vrací ke společné trajektorii. Roztavená slitina se stala homogenním prostředím a plynulosti přenosu tepla nic nebrání. V podobném duchu se nese charakter slitiny i na opačné straně křivky, kdy byl vypnut zdroj ohřevu a teplota volně klesá při konstantní okolní teplotě 23 °C (situaci zobrazuje graf Obr. 51). Křivky měřených bodů plynule klesají (na následujících grafech je patrné mírné harmonické zvlnění způsobené externím zdrojem rušení, které se naindukovalo na dlouhé přívody termoelektrických sond; zmírnění vlivu rušení bylo realizováno toroidním jádrem z amorfního kovu) až do oblasti tzv. podchlazení slitiny (rozmezí teplot 180 °C až 181 °C).



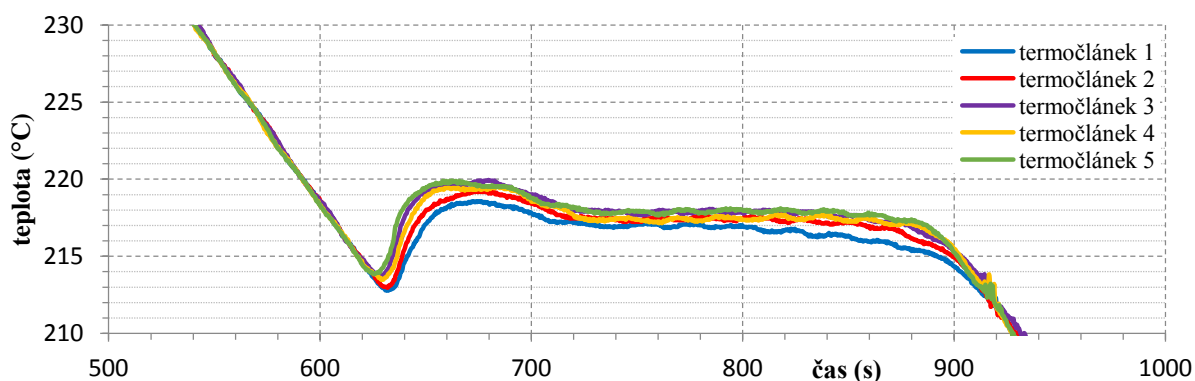
Obr. 50: Toroidní jádro tlumivky z amorfního kovu použité pro snížení vlivu rušení.

Zde nastává jev zcela opačný než v první oblasti fázové změny. Podchlazení vyvolá ve slitině potřebu shlukovat rozptýlené molekuly do zárodků budoucí krystalické struktury slitiny – nukleačních center. Na rozdíl od oblasti tání, u solidifikace se první krok odehraje uprostřed slitiny a šíří se směrem k okraji. Měřené oblasti mají mezi sebou opět malý rozestup, což je pravděpodobně dáno vlastnostmi struktury při fázové přeměně, umístěním měřené oblasti v rámci měřeného vzorku, objemem a teplo-směným povrchem uvažované tloušťky oblasti dr o poloměru r . Díky rozšíření vzniku nukleačních center po celém objemu vzorku se teplota celého měřeného vzorku zrovnoměří a vzroste nad $183\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy k hodnotě blízké bodu tání. Po tuto dobu velikost a počet center narůstá, přičemž generovaná energie zachovává stav slitiny na mezi tání. Narůstající krystalická centra tvoří pomyslný generátor, který udržuje slitiny na tomto pomezí. Po změně poměru generace tepla a jeho uvolnění do okolí teplota klesá. Pokles nastává nejdříve u okraje, kde je největší směnná plocha s okolím a šíří se směrem k centru měřicího kontejneru. Po ztuhnutí celého vzorku se teplota na výstupu sond zrovnoměří a dále je již pokles celého objemu slitiny homogenní.



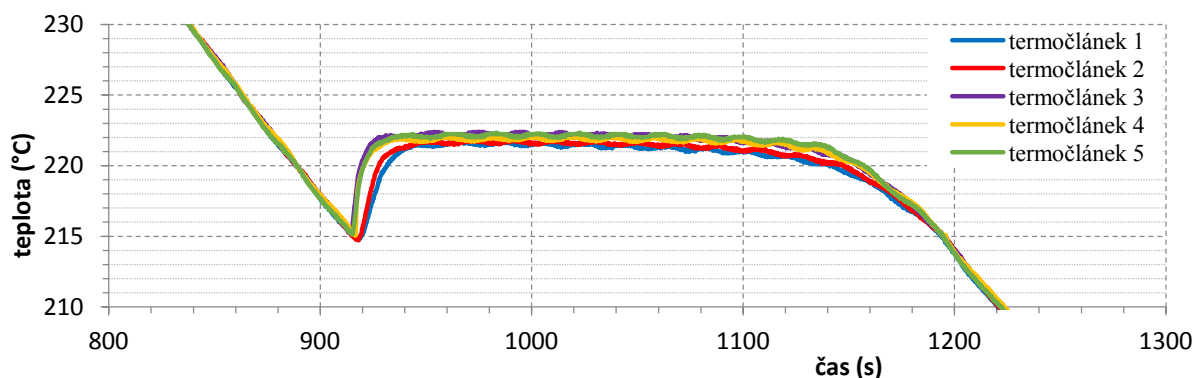
Obr. 51: Průběh teplot pájecí slitiny Sn63Pb37 v oblasti solidifikace (1. cyklus)

Tvar oblasti tuhnutí není vždy stejný, náběžné a sestupné hrany a velikost změny teploty po průchodu oblastí podchlazení se liší s ohledem na použitý typ slitiny. Každá se liší svým složením a tedy i termickými vlastnostmi. Výrazným indikátorem na křivce je náběžná hrana. U slitiny Sn-Pb teplota z oblasti podchlazení narůstá velmi pozvolna, naopak je tomu u slitiny SAC 305 na následujícím grafu. Oba gradienty se výrazně liší. Výrazný rozdíl je i ve složení. Obsahu obou slitin dominuje cín. V prvním případě je velký podíl olova, v druhém případě jsou dalšími složkami stříbro a měď. Rozdílnost náběžných hran je připisována výrazně rozdílným tepelným vodivostem použitých materiálů (viz Tab. 1). Rozdíl výsledných teplotních vodivostí slitin není na první pohled velký (tepelná vodivost slitiny Sn-Pb je $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a slitiny SAC 305 - $58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ale vliv na teplotní charakteristiku je výrazný. Na následujícím teplotním průběhu slitiny SAC 305 je patrné výrazné lokální maximum, které zasahuje výše, než je teplota tání – struktura v tento okamžik prochází téměř kompletním roztavením. Slitina složená ze tří komponentů představuje již složitý systém; její ztuhnutí se nemusí odehrávat v jednom bodě a každá část může být odlišně energeticky náročná. Proto je možné, že vznik nukleačních center některých částí generuje při tuhnutí větší množství energie v kratším čase a jiné teplotě než u zbylé části. Po odeznění této anomálie se teplota drží okolo teploty tání slitiny.



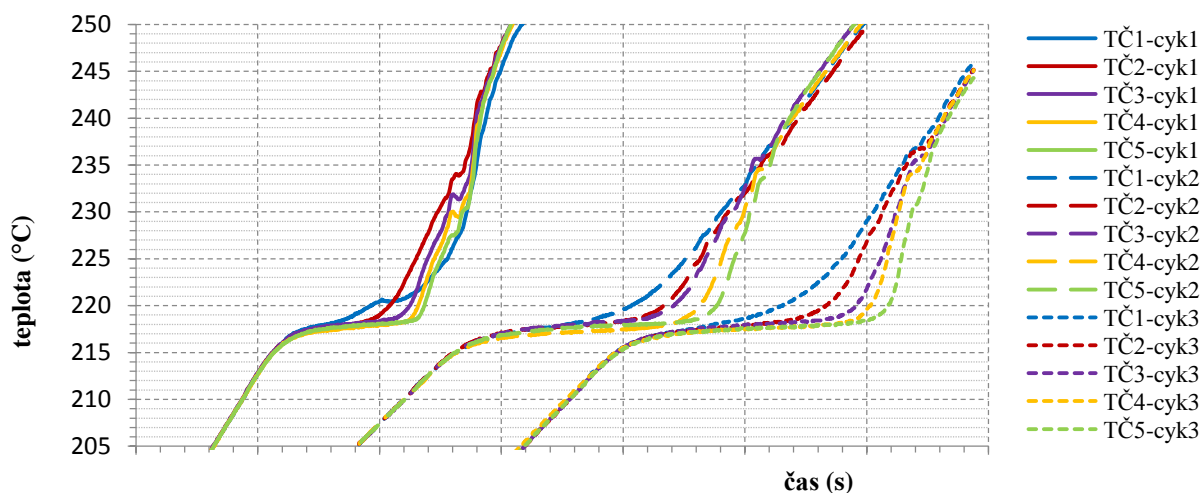
Obr. 52: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) v oblasti solidifikace (1. cyklus).

U dvoukomponentní slitiny Sn-Ag již tento výjimečný jev nenastává. Nárůst teploty z oblasti podchlazení má však ještě vyšší gradient než je tomu u předchozího případu, byť jsou jejich tepelné vodivosti velmi podobné. Odpověď může být ukryta opět ve složitější struktuře předchozí slitiny. I zde se teplota po rychlém nárůstu na krátký čas stabilizuje v bezprostřední blízkosti teploty tání 221 °C.



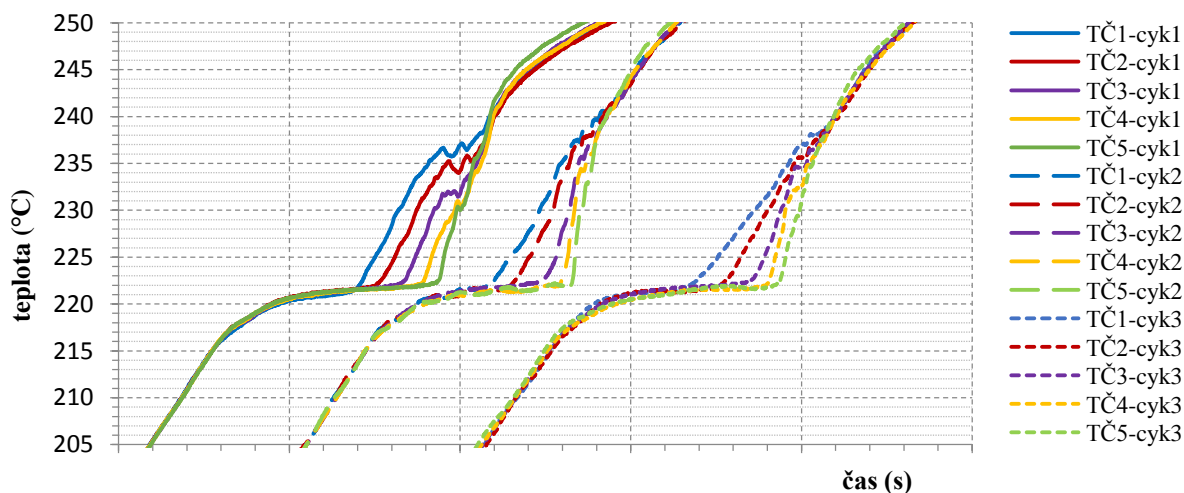
Obr. 53: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) v oblasti solidifikace (3. cyklus)

Teplotní profil nemusí zobrazovat pouze aktuální stav slitiny, ale také její změnu v čase. I když slitina nesmáčí povrch pájecí plošky a vývod součástky, může měnit své vlastnosti v důsledku délky přetavení nebo počtu přetavovacích cyklů. Roztavená slitina obsahující různé základní složky může inklinovat k tvorbě intermetalických sloučenin, jejichž objem ve slitině závisí na množství dodané energie vyjádřené „Heating faktorem“. Výrazně se tento jev projevuje u slitin s obsahem mědi a cínu, jako je tomu například u použité slitiny SAC 305. Tepelná vodivost intermetalických fází je odlišná od tepelné vodivosti slitiny (viz Tab. 1), proto by se i s jejím nárůstem mohl měnit tvar výsledné teplotní křivky. Zároveň i zde je vhodné zamyslet se nad vlivem nestejnorožného tání. Pokud by slitina netuhla v celém objemu v jeden okamžik, mohl by tento jev tvarovat teplotní profil i na počátku cyklu v oblasti tání. Důsledkem chemických změn uvnitř slitiny (tvorba intermetalických vrstev) a narůstajícím počtem cyklů by se tepelné vlastnosti postupně měnily. Příkladem jsou následující teplotní průběhy naměřené na slitinách SAC 305 (Sn96,5Ag3Cu0,5) a Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag). Každá z nich prošla třemi cykly přetavení, přičemž nebyl měřen první či nultý cyklus, při kterém se vkládala vsázka do měřicího kontejneru a měřicí sondy do taveniny. Rychlost ohřevu byla u obou slitin stejná, a to 0,22 °C/s (mimo prvního cyklu SAC 305, zde je rychlost 0,21 °C/s). Při pohledu na jednotlivé křivky všech tří teplotních cyklů je zcela patrný postup od neuspořádaného stavu k rovnoměrnosti. Tedy u prvního cyklu křivky inklinují k nahodilému chování, i když jde pouze o klamné zdání; průběh teplot v jednotlivých bodech v sobě odráží patrně některé interní pochody popsané výše. S dalšími cykly se křivky postupně vyhlazují.



Obr. 54: Průběh teplot pájecí slitiny SAC 305 (Sn96,5Ag3Cu0,5) v oblasti tání (cyklus 1., 2. a 3.).

Podobně je tomu i u slitiny Sn-Ag, kde se trend teplotních křivek podobá předchozí slitině.

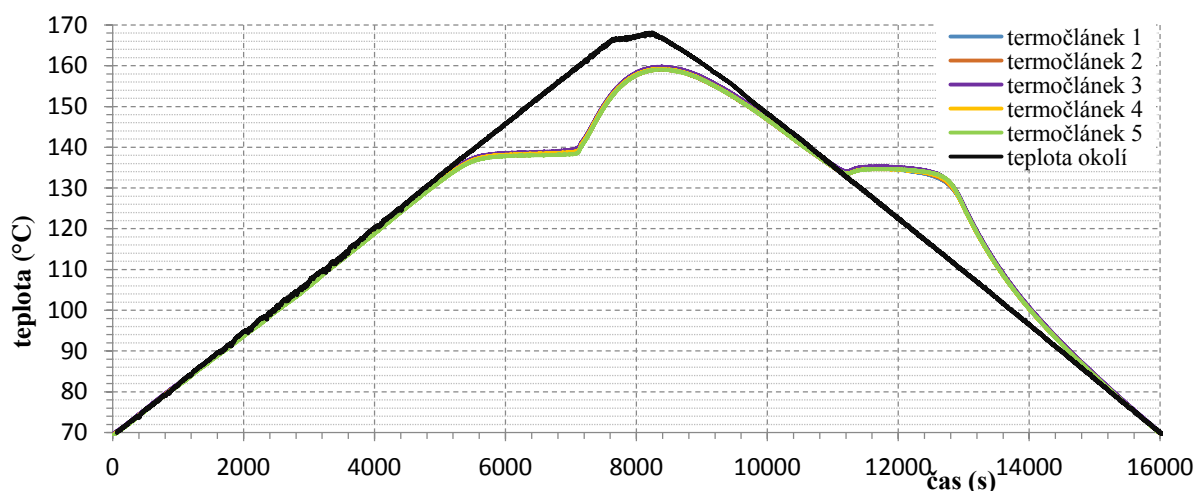


Obr. 55: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) v oblasti tání (cyklus 1., 2. a 3.).

Na charakter průběhu teplot uvnitř slitiny může mít také vliv rychlost ohřevu. Pro účely získání poznatku o chování slitin byla použita dvě klimatická zařízení, která dokázala splnit požadavky na řízený ohřev a chlazení slitiny a na skokovou změnu teploty okolí měřicího kontejneru. Z důvodu omezených technických parametrů dostupných zařízení se vhodnou pájecí slitinou pro experiment stala Sn-Bi (58Bi42Sn) s nízkou teplotou tání (138 °C). Tato pájka se krom své nízké teploty tání vyznačuje i velmi nízkou tepelnou vodivostí ($19,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), proto teplotní změny v oblastech fázových změn nebudou tak rychlé, jak tomu bylo například u kombinace cínu a stříbra.

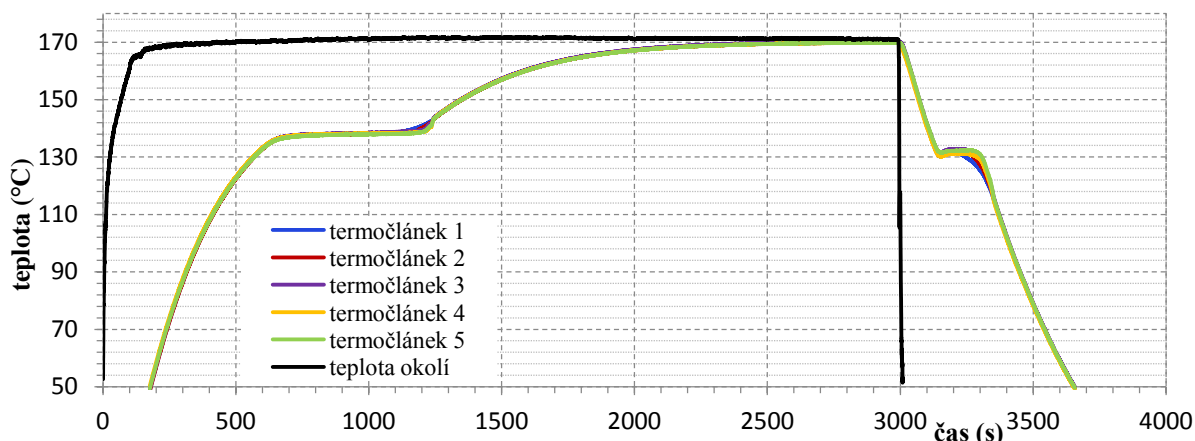
V prvním kroku se pozornost zaměřila na reakce slitiny při velmi pomalém nárůstu i sestupu teploty. Rychlost ohřevu i ochlazování byla zvolena totožně $0,01 \text{ °C/s}$. Experiment se

uskutečnil v klimatické programovatelné komoře WEISS Umwelttechnik GmbH typu WK3-100070. Na následujícím grafu je vyobrazen celý cyklus přetavení pájecí slitiny. Teploty měřících sond uvnitř taveniny velmi dobře kopírují teplotu okolí (teplotu uvnitř klimatické komory).



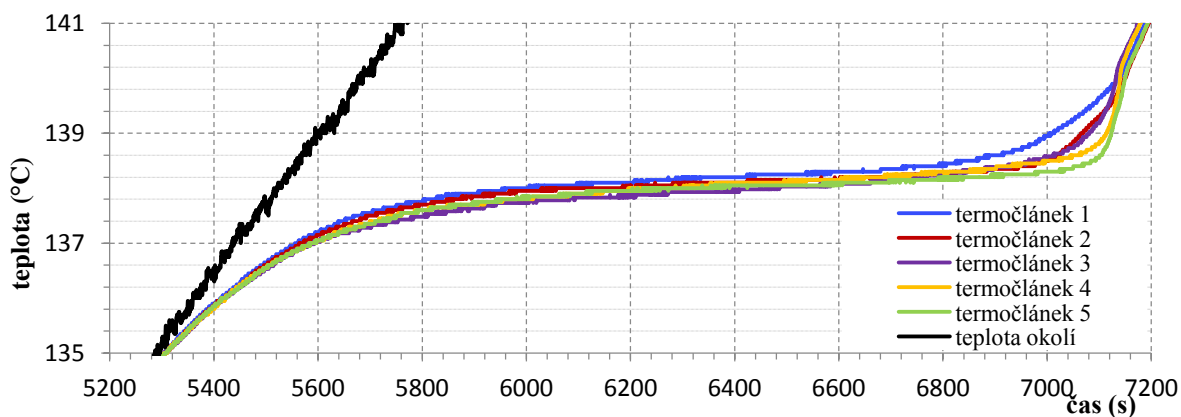
Obr. 56: Teplotní profil pájecí slitiny Sn-Bi při řízeném ohřevu a chlazení – rychlost ohřevu /ochlazení 0,01 °C/s.

V druhé části experimentu na vybranou slitinu působila rychlá změna teplot okolí. Měření bylo realizováno v klimatické šokové komoře WEISS Umwelttechnik GmbH typu TS 120-M. Na základě podkladů od výrobce slitiny byla maximální teplota horké komory nastavena na 170 °C a naopak pro rychlý pokles teploty slitiny, studená komora na teplotu -20 °C. Rychlost změny teploty díky 10 sekund trvajícím přejezdům transportního koše mezi oběma klimatizovanými sekcemi je velmi rychlá, ale teplota uvnitř měřícího kontejneru ji již nekopíruje. Přenos tepla je realizován prostřednictvím proudění vzduchu. Vzhledem k rozdílným tepelným kapacitám je ohřev slitiny vůči teplotě kontejneru pomalý, ale zato lze dosáhnout rychlejšího ochlazení. Rychlost ohřevu slitiny je okolo 0,2 °C/s a ochlazení 0,25 °C/s.



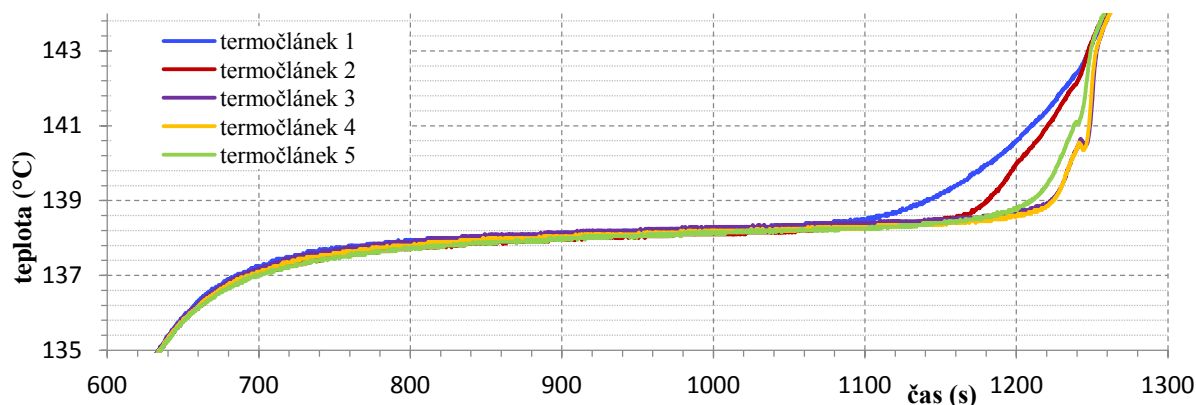
Obr. 57: Teplotní profil pájecí slitiny Sn-Bi při skokové změně mezi teplotními úrovněmi +170 °C a -20 °C.

Porovnáme-li mezi sebou oblasti tání obou typů teplotních průběhů, nalezneme drobné rozdíly. Pokud slitina prochází řízeným ohřevem, je celková doba oblasti tání přirozeně delší. Pokud se zaměříme na závěrečnou část oblasti, kde slitina mění skupenství, teploty jednotlivých měřených lokalit se na krátký čas rozcházejí, jako v předchozích případech. Ale díky pozvolnému nárůstu teploty není tento přechodný jev tak veliký (1,6 °C). Poměr délky doby této oblasti vůči celkové délce oblasti přetavení je však téměř totožný s průběhem při skokové změně teplot, a to přibližně 0,21.



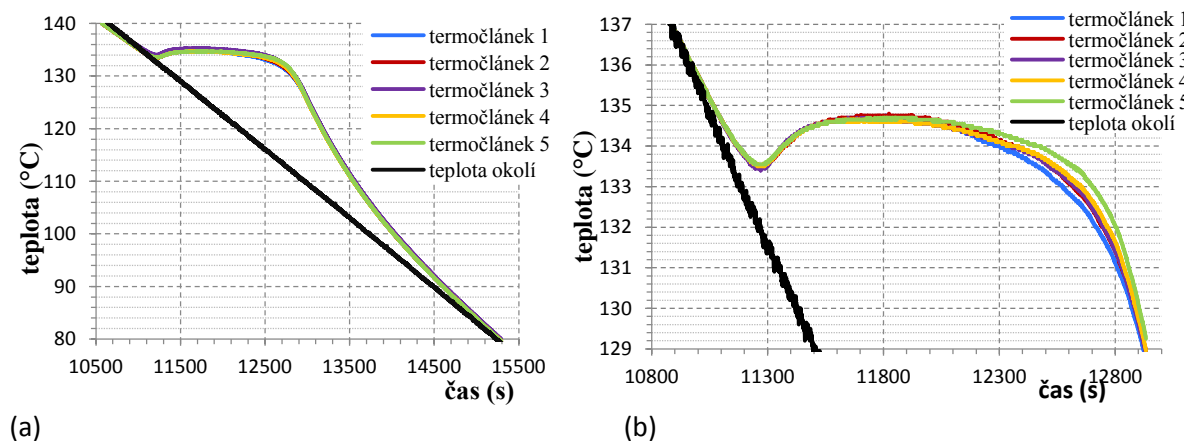
Obr. 58: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti tání při řízeném ohřevu a chlazení.

V případě experimentu v šokové klimatické komoře je projev nehomogenity u závěrečné oblasti tání teplotních průběhů jednotlivých sond mnohem patrnější. Rozdíl teplot v tomto případě před a po přechodném ději se blíží 4,6 °C, tedy 2,8 násobku předchozího průběhu. S růstem gradientu, při kterém slitina mění skupenství, narůstá ve slitině i vnitřní termické napětí, které ovlivňuje tepelnou historii slitiny.



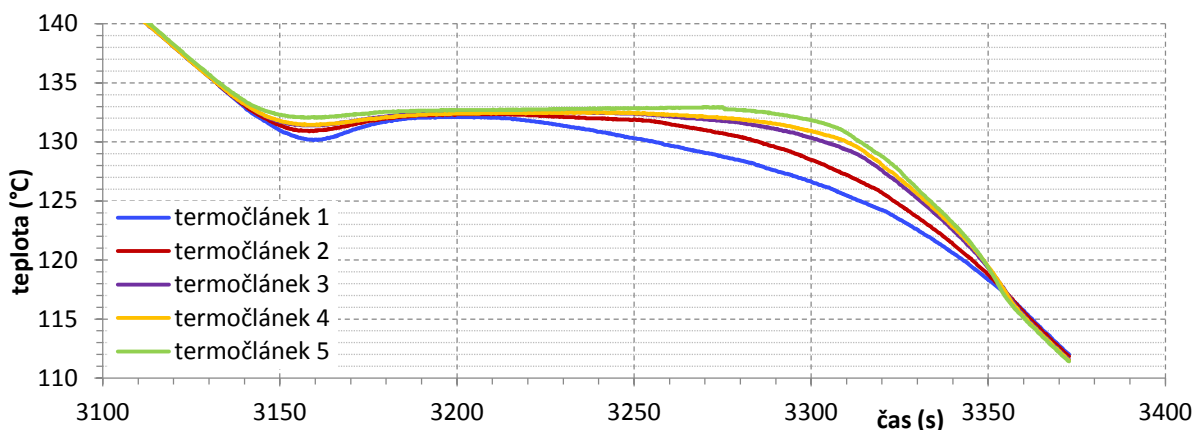
Obr. 59: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti tání při skokové změně mezi teplotními úrovněmi +170 °C a -20 °C.

Podobně se slitina chová i při tuhnutí. Čím pomalejší teplotní změny okolí, tím menší teplotní rozdíly mezi různými oblastmi uvnitř slitiny. Proto při pomalém řízeném teplotním profilu je rozdíl teplot v závěrečné oblasti tuhnutí slitiny pouze 0,9 °C, ale při skokové změně teploty je to již 5,5 °C. Ve chvíli nárůstu teploty z oblasti podchlazení a stabilizaci teploty na hranici tuhnutí je tento stav po krátkou chvíli zachován. Pokračujícím ochlazováním slitiny se teploty měřených bodů od sebe vzdalují. Zde dochází ke konečnému ztuhnutí a také termickému pnutí, stejně jako u tání. Avšak oblast tuhnutí může mít na vlastnosti a životnost budoucího pájeného spoje větší vliv (především při hromadné výrobě).



Obr. 60: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti solidifikace při řízeném ohřevu a chlazení: (a) celý průběh solidifikace, (b) detail.



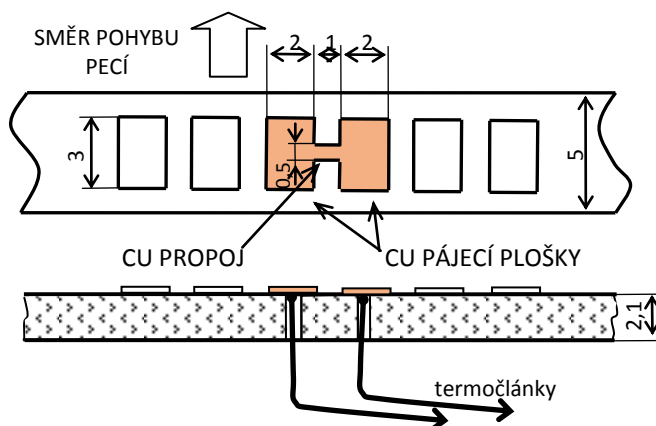


Obr. 61: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti solidifikace při skokové změně mezi teplotními úrovněmi +170 °C a -20 °C.

4.1.4 Dva body na desce propojené vodivou cestou – průběh latentního tepla

Teplotní profil je jedním z důležitých aspektů, které mají vliv na konečnou kvalitu pájených spojů. Jeho vhodné nastavení je důležité z hlediska správného přetavení pájecí slitiny, aktivace tavidla, vytváření intermetalických sloučenin a nepřesáhnutí maximální doporučené teplotní odolnosti elektrických součástek a DPS. Proto je třeba znát pochody uvnitř slitin, které toto ovlivňují. [58]

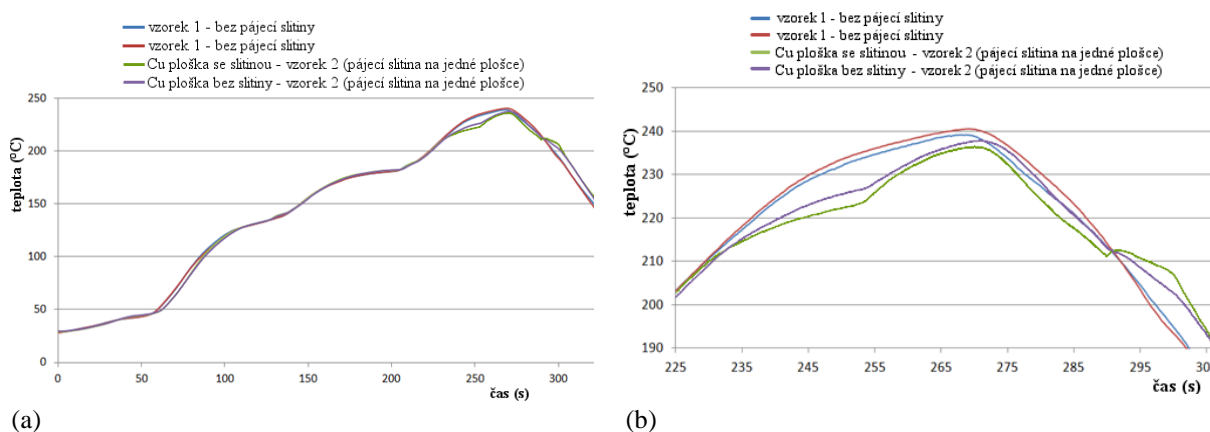
Jsou-li dva body mezi sebou fyzicky propojeny vodivou cestou, účinek vzájemného působení šířící se energie generované z fázové přeměny je mnohem znatelnější. Pro simulaci situace, kdy se dva pájecí body vzájemně ovlivňují, byl použit plošný spoj se substrátem FR4 s měděnými pájecími ploškami o rozměrech 2x3 mm (menší rozměry plošek byly vhodné i pro pozdější měření s SMD součástkami).



Obr. 62: Schematické uspořádání přípravku pro měření latentního tepla.

Pro sledování teplotní odezvy mezi oběma spoji byly použity dvě bezolovnaté pájecí slitiny Sn-Ag (Sn96,5Ag3,5) a SAC (Sn96,5Ag3Cu0,5). Pro snímání teploty z pájecích plošek byl použit obdobný postup jako v předchozích případech. Pouze deska plošného spoje se liší svými rozměry. S nimi se však také změnilo použité množství pájecí sliny na měděné plošce, a to na 25 mg. Připravené vzorky byly postupně přetavovány dle stanoveného teplotního profilu v horkovzdušné průběžné peci Mistral 260 (Technoprint, Ermelo, Netherlands). Pec o třech teplotních zónách (každá o délce 30 cm) měla nastavenou rychlost dopravníku 15 cm/min a jednotlivé zóny byly temperovány na teploty 150 °C, 200 °C a 250 °C. Nucené chlazení bylo vypnuto a vzorky chladly při konstantní teplotě 23 °C v bezprůvanovém krytu. Nejprve však byl zaznamenán teplotní profil vzorku bez aplikované slitiny na měděných ploškách (dále označen jako vzorek 1). V další fázi byl teplotní profil měřen při jedné pájecí plošce prázdné a druhé opatřené pájecí slitinou (označen jako vzorek 2). Poslední měření bylo provedeno přidáním pájecí slitiny i na druhou pájecí plošku. Latentní teplo bylo generováno z obou pájených spojů najednou (uspořádání dále označeno jako vzorek 3). [58]

Naměřené teplotní profily pájecích slitin byly porovnány se vzorkem bez slitiny, aby se dala určit velikost odchylky, která vzniká při fázové změně. Porovnání vzorku bez pájecí slitiny (vzorek 1) a s pájecí slitinou pouze na jedné plošce (vzorek 2) je zobrazeno na následujícím grafu.



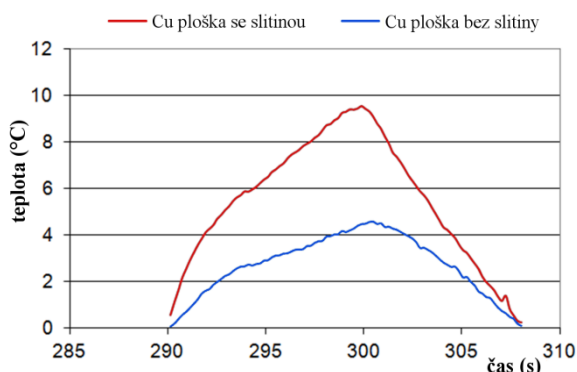
Obr. 63: Dva teplotní profily vzorku bez pájecí slitiny (vzorek 1) a dva teplotní profily vzorku 2 s jednou obsazenou pájecí ploškou (slitina SAC 305): (a) celý teplotní profil, (b) detail fázových změn teplotního profilu. [58]

Je tedy zřejmé, že skutečný naměřený průběh teplot se v oblasti fázové změny (tání / tuhnutí) výrazně liší od teplot naměřených na pájecích ploškách DPS bez slitiny (vzorek 1). U vzorku 2 se průběhy odlišují jak při tání, tak tuhnutí (slitina je pouze na jedné plošce). Při tání se křivka se slitinou opoždí; probíhá fázová přeměna a teplo se spotřebovává. Při



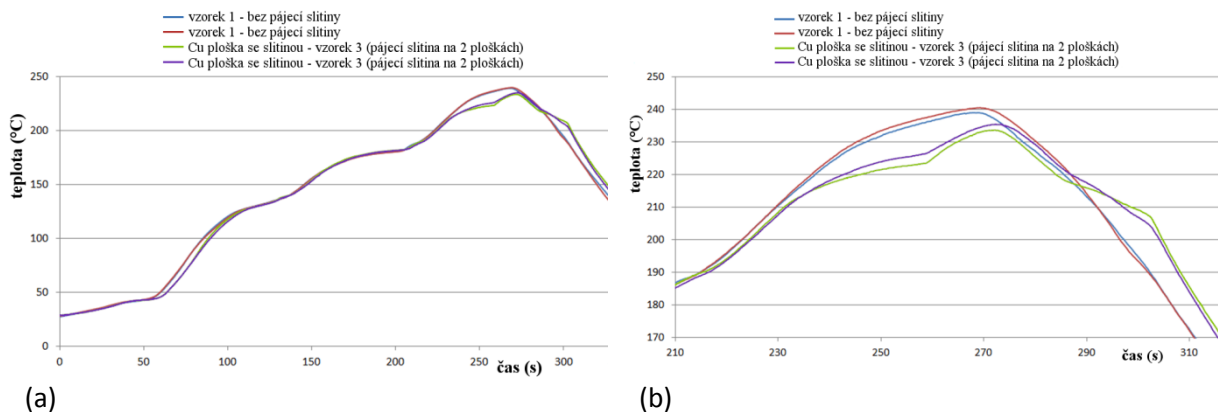
tuhnutí je tomu naopak, slitina teplo uvolňuje, dochází k podchlazení a přes vodivou cestu ohřívá sousední plošku na DPS. [58]

Snadno pak lze získat teplotní rozdíl odečtením jednotlivých křivek teplotních profilů (bez slitiny a se slitinou, viz obr. 65). Středem zájmu je především oblast tuhnutí slitiny. Následující graf poskytuje náhled na rozdíl teplot mezi vzorkem 1 (bez slitiny) a vzorkem 2 (s pájecí slitinou SAC 305). V nejvyšším bodě křivky dosahuje rozdíl teplot téměř 10 K (ploška se slitinou), zatímco u pájecí plošky bez slitiny je to téměř 5 K. Strmý počáteční nárůst teploty vychází z oblasti podchlazení.



Obr. 64: Teplotní rozdíl mezi sledovanými body v oblasti tuhnutí slitiny SAC 305 vzorku 2. [58]

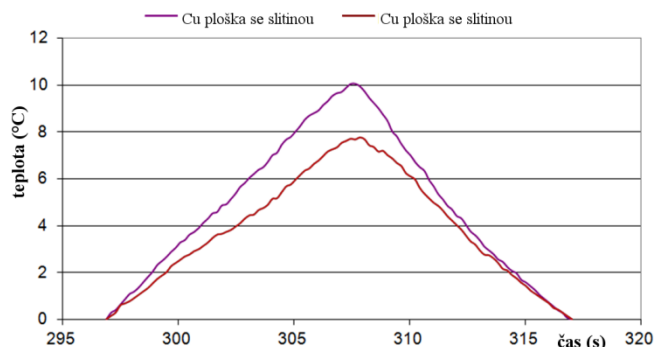
Podrobíme-li podobnému rozboru variantu, kde jsou obě pájecí plošky opatřeny slitinou, rozdíly v nárůstu teploty se změní. Na níže uvedeném grafu je znázorněn rozdíl v teplotních průbězích mezi DPS bez pájecí slitiny (vzorek 1) a DPS s oběma ploškami opatřenými slitinou SAC 305 (vzorek 3). [58]



Obr. 65: Dva teplotní profily vzorku bez pájecí slitiny (vzorek 1) a dva teplotní profily vzorku 3 se dvěma obsazenými pájecími ploškami (slitina SAC 305): (a) celý teplotní profil, (b) detail fázových změn teplotního profilu. [58]

V případě dvou pájecích plošek (vzorek 3) s nanesenou pájecí slitinou a mezi sebou propojených vodivou cestou je teplotní rozdíl v oblasti uvolnění latentního tepla menší než

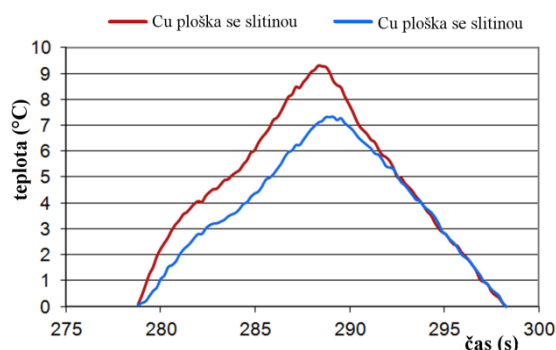
v předchozím případě. V porovnání s předchozí situací (vzorek 1 a vzorek 2) je zde situace odlišná - oba body na vzorku 3 uvolňují energii do prostoru a vzájemně se podporují.



Obr. 66: Ukázka teplotního rozdílu mezi sledovanými pájecími body v oblasti tuhnutí slitiny SAC 305 vzorku 3. [58]

Proto teplotní rozdíl mezi hodnotami vzorku 1 a vzorku 3 je v prvním případě téměř 10 K a druhého pájecího bodu téměř 8 K. V tomto případě pájený spoj, který začne tuhnout dříve, může oddálit dobu tuhnutí sousedního bodu, který začal tuhnout jako druhý vlivem uvolňování latentního tepla. [58]

Velmi podobné výsledky byly dosaženy u Sn-Ag pájecí slitiny. Na následujícím grafu je znázorněn již výsledný rozdíl mezi vzorkem 1 a vzorkem 3 (pájecí slitina aplikována na obě pájecí plošky) z oblasti tuhnutí pájecí slitiny. V okamžiku tuhnutí, kdy jeden bod začal o zlomek vteřiny dříve, teplota na spoji narostla ve vrcholném bodě o více jak 9 K a u druhého bodu s pájecí slitinou o více jak 7 K. [58]



Obr. 67: Ukázka teplotního rozdílu mezi sledovanými pájecími body v oblasti tuhnutí slitiny Sn96,5Ag3,5 vzorku 3. [58]

Skutečná teplota pájecího bodu závisí na mnoha faktorech, jako je například typ pájecí slitiny, tepelná kapacita rozmístění a množství sousedních pájených spojů, struktura DPS, tepelná vodivost použitých materiálů a mnoho dalších. Jak dokládají grafy výše, uvolnění latentního tepla během tuhnutí pájecí slitiny má společně s ostatními body vliv na své

nejbližší okolí. Zároveň se díky časovým posunům při tání a tuhnutí mění teplotní profil mezi jednotlivými body, což může vést i k některé z výrobních vad, jako je např. „Tombstoning“.

4.1.5 Šíření latentního tepla přes součástku mezi pájecími body

Pájecí slitina vykazuje s četností a délkou doby přetavení strukturní změny, které se v konečné fázi mohou projevit i na charakteru výsledného latentního tepla generovaného pájecí slitinou.

4.1.5.1 Teoretická a technická část experimentu

V běžně používaných bezolovnatých pájkách na bázi Sn-Cu-Ag lze zaznamenat přítomnost intermetalických sloučenin, které mohou zapříčinit nehomogenitu pájeného spoje. Jejich přítomnost má dva původy. Jedny jsou již na počátku rovnoměrně rozptýleny v objemu pájecí slitiny a druhé se vytvářejí v průběhu procesu přetavení na rozhraní mezi pájecí slitinou a pájecími ploškami.

Nastíníme-li například situaci připájené elektronické součástky k pájecí plošce na desce plošného spoje, propojujeme součástku opatřenou vrstvou niklu (Ni) a měděnou pájecí plošku na DPS pájecí slitinou Sn-Ag-Cu; vzniknou dvě rozhraní. V obou případech vznikají mezifázové struktury. Nad vrstvou niklu vzniká intermetalická sloučenina $(\text{Cu, Ni})_6\text{Sn}_5$, jejíž koeficient tepelné roztažnosti je téměř shodný se slitinou SAC 305 a Sn-Cu. Na druhé straně pájeného spoje mezi vrstvou slitiny a měděným substrátem vzniká mezivrstva Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . [57]

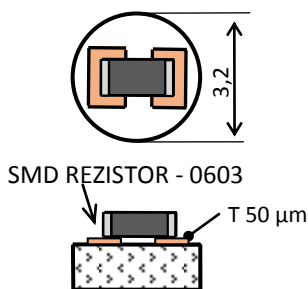
Z hlediska členitého složení spoje, vznikají v jeho objemu četná vnitřní pnutí na základě odlišných tepelných vodivostí a tepelných roztažností. Čím větší rozdíly v těchto termofyzikálních vlastnostech mezi vrstvami panují, tím větší vnitřní napětí vzniká ve struktuře spoje. Hodnoty koeficientu tepelné roztažnosti a tepelné vodivosti základních materiálů a jejich intermetalických slitin jsou uvedeny v tabulce 1. Na základě rozdílnosti jednotlivých složek pájeného spoje je nutno na něj nazírat jako na heterogenní systém, kde v důsledku různých teplotních vlastností jednotlivých vrstev mezi nimi vzniká vnitřní tepelné pnutí. A to je pádný důvod ke studování tepelného chování pájeného spoje při skupenských změnách, zejména během fáze tuhnutí. [57]



Již ve vícero dřívějších studiích byl zkoumán vliv teplotního profilu na pájený spoj z hlediska tvaru [59], [60], typu přetavení [61], [62], modelování a optimalizace procesu přetavení [63], [64], teploty nad teplotou tání slitiny – „Heating factor“ [65], [66] a z hlediska vlivu rychlosti ochlazování na změnu mikrostruktury slitiny [67], [68]. Avšak v těchto studiích byl teplotní profil měřen na různých místech desky plošných spojů s termočlánky upevněnými na jejím povrchu pomocí kaptonové lepicí pásky nebo pájecí slitiny s teplotou tání vyšší než jaká byla použita v peci. Termočlánky určené k měření sledované slitiny do ní nebyly ponořeny, proto tedy podstata změn teplotního profilu při tání a tuhnutí byla zcela ignorována. Předchozí studie také uvažovaly pouze jeden osamocený pájený bod [69] na DPS a statisticky se předpokládalo, že všechny ostatní se chovají totožně. Tento předpoklad však může být nesprávný, neboť nejvýraznější vzájemný vliv jednotlivých bodů nastává v okamžiku jejich tuhnutí na desce plošných spojů. Důsledkem vzájemného působení jednotlivých bodů je oblast podchlazení kombinovaná s uvolněním velkého množství latentního tepla; jev je typický pro cín (Sn) a jeho slitiny. Avšak jsou již i první výsledky měřené na skutečných součástkách připájených ve dvou bodech k DPS získaných na základě měření na DSC [70]. Již z těchto výsledků je patrné, že oba spoje nemusí ztuhnout ve stejný okamžik. Tuhne-li slitina, latentní teplo uvolněné z prvního spoje ohřívá desku plošného spoje a ta zvyšuje teplotu druhého spoje; díky tomu nastává tuhnutí druhého spoje se zpožděním. Počet pájených spojů na skutečné desce plošných spojů je mnohem vyšší, tedy i vliv latentního tepla na proces tuhnutí může být mnohem významnější.

Na tyto výsledky navazuje následující experiment. Pro jeho realizaci byla použita pájecí slitina SAC 305 (Sn96,5Ag3Cu0,5) pojící reálnou SMD součástku k pájecím ploškám na DPS. Vyrobené vzorky podstoupily měření na DSC, jež bylo provedeno s ohledem na oblast podchlazení a rekalescenci. Získané výsledky byly porovnány s naměřenými teplotami tání a tuhnutí SAC 305 totožných vzorků měřených v průběžné horkovzdušné peci, používané pro výrobu prototypů DPS (výsledky měření z předchozí kapitoly 4.3.1). [57]





Obr. 68: Schematické znázornění použitých přípravků pro měření teplotních charakteristik metodou DSC.

Pro výrobu vzorků použitých při měření na DSC byla použita slitina Sn96,5Ag3Cu0,5 (Kester Co., Itasca, IL, USA), komerčně vyráběné DPS s tloušťkou měděné vrstvy 50 μm . Tvar připravených vzorků byl kruhový o průměru 3,2 mm, díky tomu je bylo možno umístit na dno měřicího kelímku DSC. Ve středu DPS byly umístěny dvě měděné pájecí plošky s rozměry odpovídajícím součástkám pro povrchovou montáž (SMD - Surface Mounted Device) - rezistor 0603. Pájecí pasta byla na měděné plošky nanášena šablonovým tiskem přes šablonu (tloušťky 100 μm) a před jejím přetavením byl na pájecí plošky osazen SMD rezistor. Měření DSC se uskutečňovalo v ochranné atmosféře He přístroje SETSYS Evolution 24 (SETARAM Instrumentation, Caluire, Francie). Rychlost ohřevu / chlazení byla nastavena na hodnotu 10 K/min. Pro každé měření byly provedeny dva až tři termální cykly (průběhy) s maximální hodnotou 250 $^{\circ}\text{C}$.

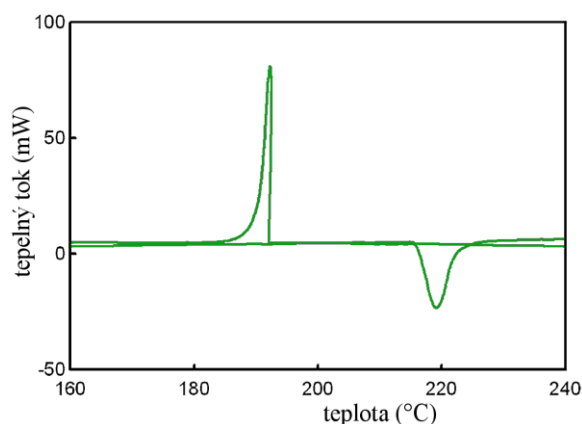


Obr. 69: Použitá měřicí aparatura pro analýzu DSC.

4.1.5.2 Naměřené výsledky DSC analýzy

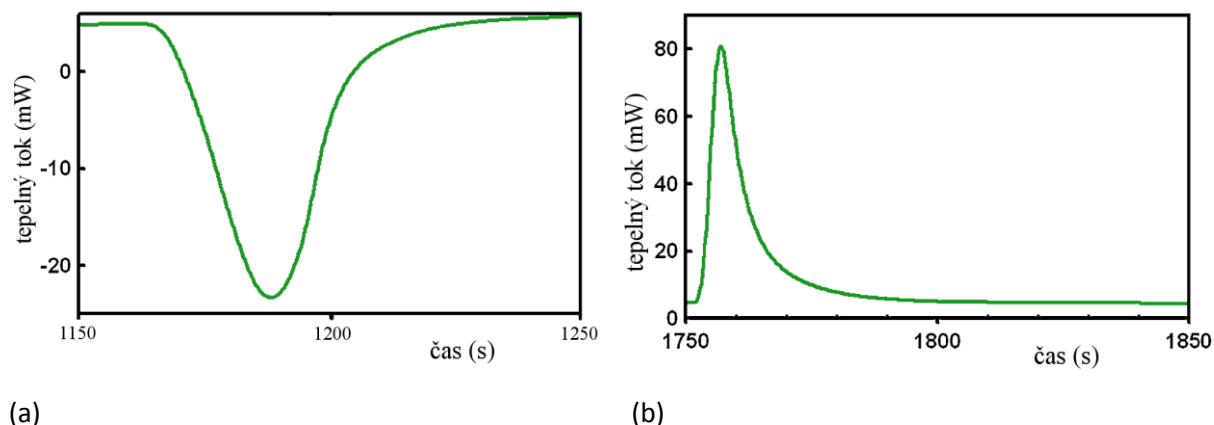
Aby bylo možno posoudit naměřenou odezvu chování pájených spojů SMD rezistoru na desce plošného spoje, je nutno znát chování čisté pájecí pasty. Na následujícím grafu je zobrazeno chování čisté pájecí pasty SAC 305, u níž je možno pozorovat v průběhu procesu

tuhnutí při podchlazení výraznou hysterezi 24 °C. Její přítomnost nám potvrzuje, že teplota tání je vyšší než teplota tuhnutí. Oblast podchlazení je spojena s velmi rychlým tuhnutím slitiny a je doprovázena výrazným nárůstem teploty. [57]



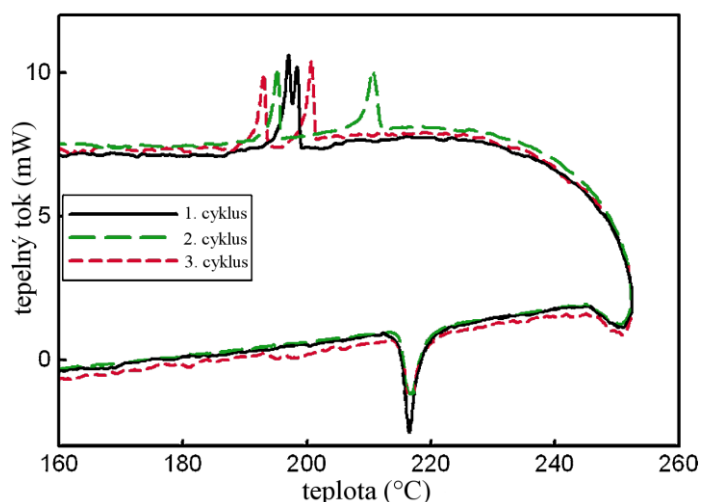
Obr. 70: Výsledný graf analýzy DSC - závislost tepelného toku na teplotě čisté pájecí pasty SAC 305.

Pokud zobrazíme naměřené výsledky pájecí pasty jako závislost tepelného toku na čase, je možné odečíst maximální zvýšení teploty v okamžiku tuhnutí a uvolnění latentního tepla do okolí. Nárůst teploty je téměř čtyřikrát vyšší než ekvivalentní pokles teploty v průběhu tání pájecí pasty. Plochy obou vrcholů jsou však stejné. Stanovení entalpie vzorku však není možné, neboť pasta obsahuje tavidlo. Z časového hlediska proces tání slitiny trval 34,6 s a solidifikace trvala pouze 10,6 s (výpočet hodnot je na základě rozdílu časů náběžné a sestupné hrany vrcholu). Je také třeba zmínit, že teploty dosažené pomocí analýzy DSC jsou nižší než reálné teploty, a to díky tepelným ztrátám způsobeným odvodem tepla do okolí (měřicí kelímek DSC, Pt části aparatur, které jsou umístěny mezi termočlánkem a měřeným vzorkem, apod.). Zanedbatelnou část tepelných ztrát lze také připsat uvolnění energie do okolí. Naměření skutečného nárůstu teploty během tuhnutí je možné stanovit ponořením termočlánku přímo do taveniny. Jak již bylo uvedeno výše, literatura uvádí, že při tuhnutí 163,2 mg čistého cínu naměříme ponořeným termočlánkem v tavenině nárůst teploty o téměř 30 °C a o téměř 13 °C, pokud totéž budeme měřit diferenční termickou analýzou (DTA) [19]. Tato analýza také způsobuje zanedbatelnou deformaci vrcholů, avšak je-li solidifikace měřena ponořeným termočlánkem, jsou v průběhu zaznamenány i výrazně ostřejší hrany v počáteční fázi tuhnutí, které poukazují na okamžitý nárůst teploty.



Obr. 71: Graf zobrazující závislost tepelného toku na čase: (a) při ohřevu – tání slitiny, (b) při ochlazování – tuhnutí slitiny.

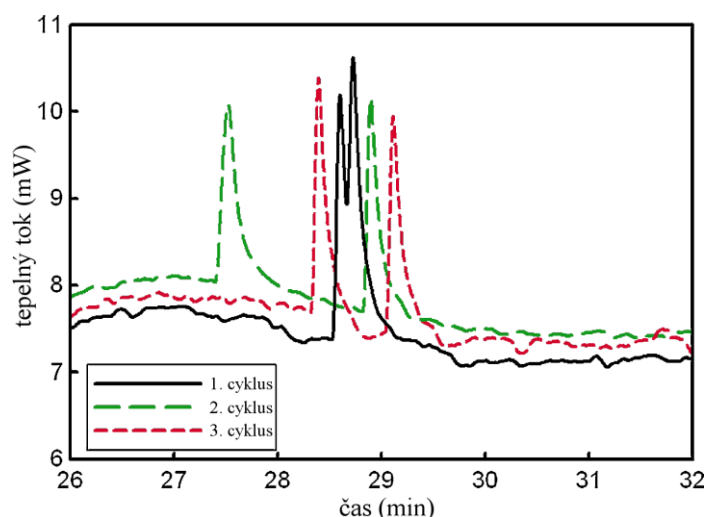
Použitím pájecí pasty SAC 305 v reálné aplikaci pájeného spoje, kde slitina vzájemně pojí elektronickou součástku s vývody potaženými vrstvou Ni a měděné pájecí plošky na DPS, dochází ke snižování hystereze, která je vyobrazena na následujícím grafu.



Obr. 72: Závislost tepelného toku na teplotě testovaného vzorku se dvěma pájecími body pojícími SMD odpor s DPS.

Z průběhu zjišťujeme, že teplota tání zůstává neměnná, zatímco tuhnutí slitiny se odehrává ve dvou různých časech (dva vrcholy). Ve třech po sobě následujících cyklech přetavení teplotní hystereze postupně narůstala; a to: 5 °C ($T_s = 211$ °C), 14 °C (201 °C) a 17 °C (199 °C). Výpočet hystereze byl brán vždy od prvního vrcholu. V každém cyklu v oblasti solidifikace jsou přítomny vždy dva vrcholy, avšak teploty, při nichž k tomu dochází, mají náhodný teplotní rozsah. V okamžiku, kdy dochází k roztavení slitiny SAC 305, vznikají mezifázové reakce mezi slitinou a materiály, s nimiž je v kontaktu (Ni, Cu, Sn). Na toto chování ve své práci poukázal Chen a kol. [71], který se zabýval zkoumáním tohoto

typu mezivrstev v závislosti na žihání po procesu přetavení. V rámci této studie se autor zaměřil na tři typy situací: rychlé ochlazení slitiny 3,5 °C/s, žihání po dobu 50 s při 210 °C a žihání po dobu 100 s při 210 °C. Kvantitativní analýza hodnotící intermetalickou strukturu (Cu, Ni)₆Sn₅ na rozhraní vrstev prokázala, že prodloužení doby žihání zvyšuje koncentraci Sn a snižuje koncentraci Cu, avšak koncentrace Ni zůstává konstantní. Působení vyšší teploty na růst intermetalických vrstev u pájecích slitin SAC na měděném substrátu uvádí studie Niwat a kol. [72]. Následující obrázek zobrazuje průběh časové závislosti tepelného toku druhého a třetího cyklu. Doba mezi teplotami tuhnutí obou pájených spojů je přibližně 1 minuta. Z toho je možné odvodit, že v okamžiku ztuhnutí prvního spoje je druhý stále ještě v kapalném stavu. Ztuhnutí obou spojů tedy neprobíhá současně. V publikaci Chen a kol. [71] usuzuje, že v každém pájeném spoji musí existovat odlišné typy intermetalických vrstev.



Obr. 73: Průběh tepelného toku v závislosti na čase v oblasti tuhnutí slitiny SAC 305 u testovaného vzorku se dvěma pájecími body pojícími SMD odpor s DPS.

Avšak vlastní přetavení pájecí slitiny během procesu výroby desek plošných spojů probíhá reálně v podstatně kratším časovém úseku než jak bylo možné nastavit procesy přetavení v opakujících se cyklech u měřicího systému DSC. Toto zařízení neumožňuje nastavit reálný časový profil. Ale s ohledem na to, že testovaný vzorek obsahoval pouze dva spoje, je variabilita použitých materiálů a tepelných vlastností mnohem nižší než u kompletní DPS. Neboť kompletní deska plošného spoje představuje nezměrný počet kombinací použitých elektronických součástek, povrchových úprav a geometrických uspořádání vodivých cest a pájecích plošek, vytváří tak ohromnou variabilitu tepelných vlastností DPS či celých sestav. Takové systémy jsou z hlediska tepelných toků a vnitřích pnutí pájených spojů velmi složité a jen těžko předvídatelné. [57]

Tepelná hystereze mezi oblastmi tání a tuhnutí slitiny SAC 305 je tedy u reálných spojů vždy nižší, než u čistépájecí pasty. Tento jev je pravděpodobně způsobován přítomností intermetalických vrstev na rozhraní mezi pájkou a pevnými částmi spoje. Intermetalické sloučeniny se poté na rozhraní v průběhu tuhnutí chovají jako nukleační centra. Je tudíž nutno předpokládat, že každý tepelný spoj na DPS má vlastní tepelnou historii, která určuje výsledné fyzikální a chemické vlastnosti. Poté je výsledná tepelná anamnéza u DPS závislá na hustotě pájených spojů, neboť každý je ve fázi tuhnutí zdrojem tepla. Uvolněné teplo je díky přirozenému gradietu vedeno do chladnější části DPS, na čemž má největší zásluhu měď; ta disponuje jednou z nejvyšších tepelných vodivostí pohledu materiálů použitých na desce plošných spojů. Je-li v bezprostředním okolí jednoho bodu vyšší hustota měděných ploch (pájený bod je velmi rychle chlazen), bude jeho tepelná historie jiná, než u pájeného bodu, v jehož blízkém okolí je mnoho dalších pájených bodů (každý z okolních pájených bodů představuje zdroj tepla – sledovaný bod chladne pomaleji). V prvním případě bude doba kontaktu pájecí slitiny v tekutém stavu s pájecími ploškami mnohem kratší (rychlé ochlazování pájky), než u druhého případu. Vlastní rychlost ovlivňuje uvolnění zbytkových a vnitřních napětí, které existují v pájených spojkách, kde jsou propojeny různé materiály s odlišnými tepelnými vlastnostmi. [57]

Výše popsané výsledky měření byly získány v teplotním režimu, při kterém rychlosti ohřevu i chlazení vzorku mají mnohem pomalejší charakter než je tomu u reálného procesu. Zařízení pro DSC analýzu sloužilo pro určení transformačních teplot a entalpie. Optimální rychlost ohřevu/ochlazování je okolo 10 K/min. Uvedený experiment navazuje na předchozí měření uvedené v kapitole „4.1.4Dva body na desce propojené vodivou cestou – průběh latentního tepla“, které probíhalo ve skutečné horkovzdušné průběžné peci, kde jsou změny teplot mnohem rychlejší než v zařízení pro DSC analýzu. Pro porovnání, celý proces v reálné peci se odehraje za cca 360 s, naproti tomu DSC analýza trvala okolo 1850 s.

4.2 Nárůst tombstoningu při procesu pájení v parách

I když technologie pájení v parách disponuje mnoha výhodami, přináší také některé nevýhody, především v oblasti spolehlivosti elektrotechnické výroby; například zvýšený počet chyb v podobě tombstoningu. Tento jev je nejvíce podporován nerovnováhou smáčivých sil působících na pájený spoj. Na základě tohoto předpokladu byly změny velikosti smáčivých sil v průběhu pájení měřeny a analyzovány. Použitím pájecích kapalin dochází ke



změně rovnováhy mezi vektory povrchového napětí a tím dochází ke změně velikosti smáčivé síly. Pro experiment byly vybrány dvě pájecí slitiny - zástupcem olovnatých se stala Sn63Pb37 a za skupinu bezolovnatých SAC 387, a také dva typy pájecích kapalin – Galden LS 230 a Galden HS 240. [41]

4.2.1 Teoretická a technická část experimentu

Vložíme-li desku plošného spoje do plynné fáze pájecí kapaliny, začne pájecí kapalina (Galden) na desce kondenzovat a na povrchu vytvoří tenkou vrstvu, která přichází do kontaktu se všemi prvky DPS a ovlivňuje je. S rostoucí miniaturizací součástek míra působení kapaliny narůstá. Pro experiment byly zvoleny pájecí slitiny a pájecí kapaliny uvedené v následující tabulce.

Tab. 2: Pájecí slitiny a pájecí kapaliny použité v experimentu [41]

pájecí slitina / pájecí kapalina	slitina SAC 387	Slitina SnPb	pájecí kapalina Galden LS 230	pájecí kapalina Galden HS 240
materiálové složení	Sn 95,5; Ag 3,8; Cu 0,7	Sn 63; Pb 37	PFPE (perfluoropolyether)	PFPE (perfluoropolyether)
teplota tání / teplota varu [°C]	217 (eutektikum)	183 (eutektikum)	230	240
hustota [g/cm ³]	7,4	8,4	1,82	1,82
povrchové napětí	470 mN/m při 245 °C (Stephens, 2006)	417 mN/m (vzduch) 464 mN/m (dusík) při 233 °C (Siewert a kol., 2002)	20 mN/m při 25 °C (Solvay, 2014)	20 mN/m při 25 °C (Solvay, 2014)

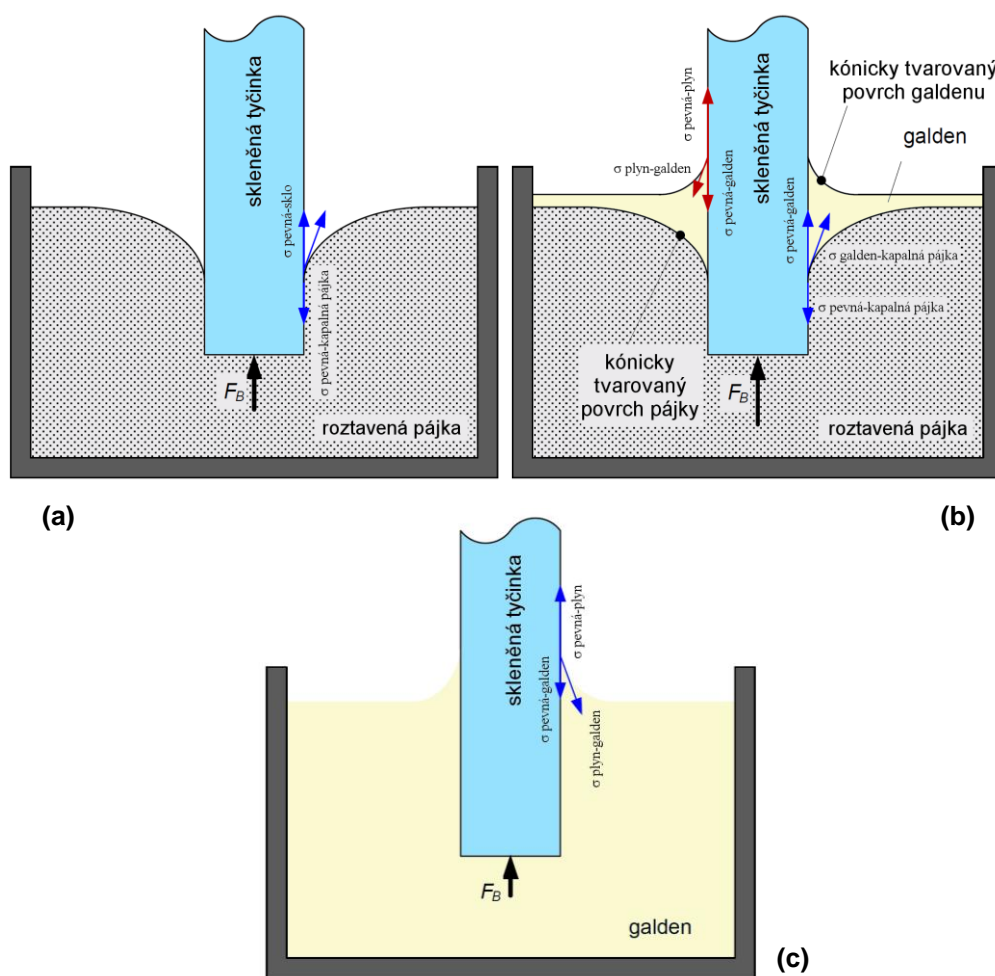
Velikost smáčecí síly byla měřena pomocí upraveného zkušební vzorku ve tvaru válce o průměru 2,3 mm vyrobeného tažením z křemičitého skla, který byl ponořen do roztavené pájecí slitiny a pájecí kapaliny. Tento typ vzorku byl vybrán na základě odolnosti vůči oxidaci, nesmáčivému povrchu v pájecí slitině a velmi hladkému povrchu. Testovaný vzorek je proto možné opakovaně použít.

Aby bylo možno detekovat úroveň změny povrchového napětí v přítomnosti Galdenu, byl experiment rozdělen do tří částí. V první části se měření odehrávalo pouze s čistou pájecí slitinou. V druhé části měření pokračovalo s pájecí slitinou v kombinaci s pájecí kapalinou. V posledním bodu experimentu byl měřen vliv samotného Galdenu na výslednou měřenou sílu. Použitý měřený vzorek byl před každým dalším měřením očištěn a vytemperován



na teplotu okolí, aby tepelná setrvačnost z předchozího měření neovlivňovala měření následující.

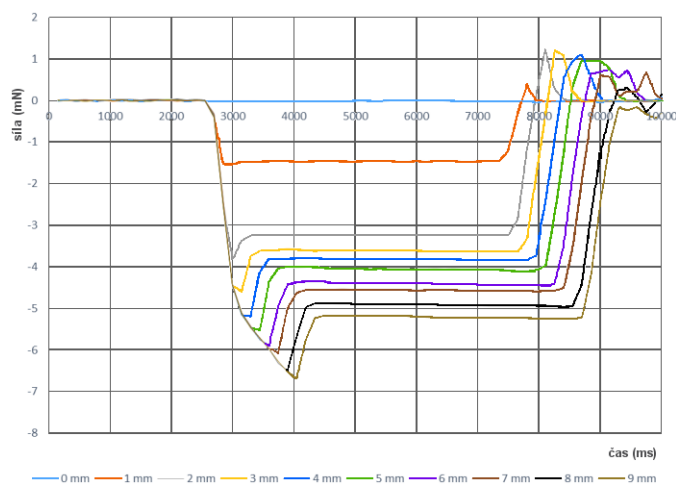
Pro realizaci testu byla použita měřící aparatura Meniscograph apparatus GEC solderability tester Mk6A. Do zařízení byla instalována lázeň o menším objemu (nahrazovala původní), vyrobená dle potřeb experimentu (vybavená stupnicí pro detekci výšky hladiny). Nově implementovaná lázeň v aparatuře umožnila přesnější měření i za přítomnosti pájecí kapaliny. Schematické znázornění tří výše popsaných experimentů s popisem jednotlivých vektorů povrchového napětí je uvedeno na následujících obrázcích.



Obr. 74: Schematické uspořádání třech kombinací pro měření smáčecí síly: (a) čisté roztavené pájecí slitiny, (b) roztavené pájecí slitiny s vrstvou Galdenu na jejím povrchu, (c) čistého Galdenu. [41]

Aby získané hodnoty měly patřičný vypovídající charakter, bylo nutné zvolit správnou hloubku ponoru zkušební vzorku. Pokud je nesmáčivá zkušební tyčinka ponořena do kapaliny, vztahová síla odpovídá nejen jejímu objemu pod úroveň hladiny, ale také kuželovitému tvaru povrchu kapaliny v oblasti vzorku, která je jím vytlačena (viz Obr. 74

(a)). Po překročení určité hloubky ponoření, se plocha kónického tvaru povrchu kapaliny u vzorku dále nemění a vztlaková síla již roste lineárně s objemem ponořené zkušební tyčinky. Následující graf znázorňuje průběh velikosti smáčecí síly pro různé hloubky ponoru zkušební vzorku (0 mm – 9 mm). Z průběhů je zřejmé, že pro dosažení korektních výsledků měření musí být minimální hloubka ponoru 2 mm. Proto pro další pokusy byla volena hloubka 5 mm. [41]

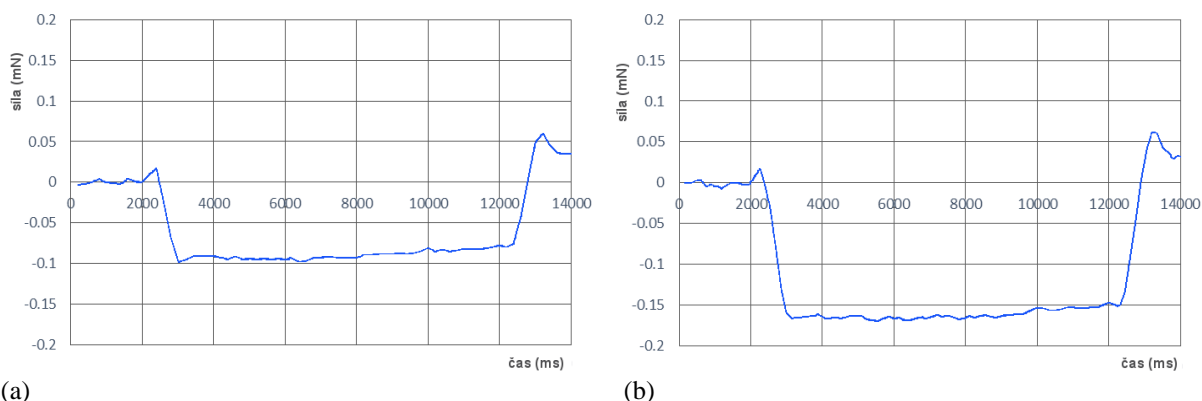


Obr. 75: Průběh velikosti smáčecí síly v závislosti na čase pro různé hloubky ponoru (od 0 mm do 9 mm) testovacího vzorku; použitá pájecí slitina SAC. [41]

Pro vyhodnocení vlivu Galdenu na povrchové napětí bylo na povrch roztavené pájecí slitiny aplikováno přibližně 0,8 ml pájecí kapaliny (což odpovídá stavu, kdy byla na povrchu pájecí slitiny 2 mm vysoká hladina Galdenu). Slitina i Galden byly zahřívány až na teplotu varu pájecí kapaliny, aby byly vytvořeny totožné podmínky jako při technologii pájení v parách. V okamžiku dosažení této teploty bylo zahájeno měření. Každé měření bylo opakováno nejméně osmkrát za sebou; uvedené výsledky jsou jejich průměrem. V okamžiku ponoření je možno shledat výraznou odlišnost mezi oběma kapalinami vůči vzorku. Zatímco tyčinka z křemičitého skla je pájecí slitinou zcela nesmáčivá, u Galdenu je tomu právě naopak (situaci znázorňuje Obr. 74 (c)). [41]

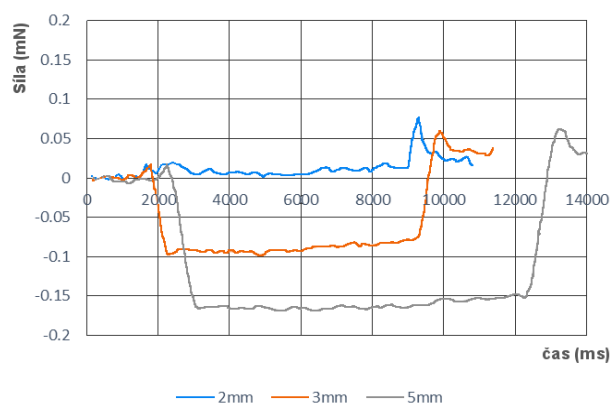
Proto bylo provedeno ověřovací měření na samotném (jednom typu) Galdenu LS 230, na kterém bude patrný vliv smáčecí a vztlakové síly působící na vzorek. Výsledná průměrná hodnota naměřené síly pro skleněnou tyčinku ponořenou do hloubky 5 mm je přibližně 0,15 mN (průběh síly zobrazuje obr. 76). Zjištěná hodnota je zanedbatelná v porovnání s hodnotou 4,0 mN naměřenou při ponoru zkušební vzorku 5 mm do roztavené pájecí slitiny. Tvar výsledné smáčecí křivky s Galdenem má však nesmáčivý charakter, ikdyž samotný Galden zkušební skleněnou tyčinku smáčí. Tento jev je způsoben vztlakovou silou,

kteřá svou velikostí převyšuje smáčecí sílu. Zároveň je síla povrchového napětí F_γ pro roztavenou pájecí slitinu vyšší než pro pájecí kapalinu - Galden (viz Tab.2). [41]



Obr. 76: Výsledek měření smáčecí síly Galdenu LS 230 (pájecí kapaliny) při ponoření zkušební skleněné tyčinky: (a) 3 mm, (b) 5 mm. [41]

Jak je patrné z grafu na Obr. 78, po poklesu křivky při ponoření nesmáčivého vzorku velikost síly nezůstává celou dobu zcela konstantní, ale v čase mírně narůstá. Tento pozvolný růst je možné vysvětlit klesáním vztlakové síly (zvedáním vzorku) v důsledku vypařování pájecí kapaliny, tím se pomyslně snižuje hloubka ponoru; na rozdíl od síly povrchového napětí F_γ , která je na hloubce ponoru nezávislá. Pozorovaná rychlost odparu pájecí kapaliny byla přibližně 0,8 ml/min (to odpovídá poklesu hladiny Galdenu o 2 mm/min). Proto bylo každé měření s Galdenem zahájeno deset sekund poté, co Galden dosáhl bodu varu. Doba sestupu vzorku do měřicí polohy se odvíjela od nastavené metody měření na smáčecích vahách. Další příčinou nárůstu měřené síly byl efekt kondenzace par. Odpařený Galden z měřicí lázně opětovně kondenzoval na zkušební tyčince s nižší teplotou a navyšoval její hmotnost (proto křivka grafu po vytažení vzorku z měřicí lázně nekončí v úrovni 0 mN jako na počátku měření). Efekt je snadno pozorovatelný nejen pohledem, ale i na grafickém průběhu síly. Proto postačí, ponoříme-li vzorek pouze do menší hloubky – 2 mm, pak vztlaková síla a síla vyvolaná povrchovým napětím jsou téměř v rovnováze. Na následujícím grafu je zachycen tento jev v závislosti na hloubce ponoru vzorku.



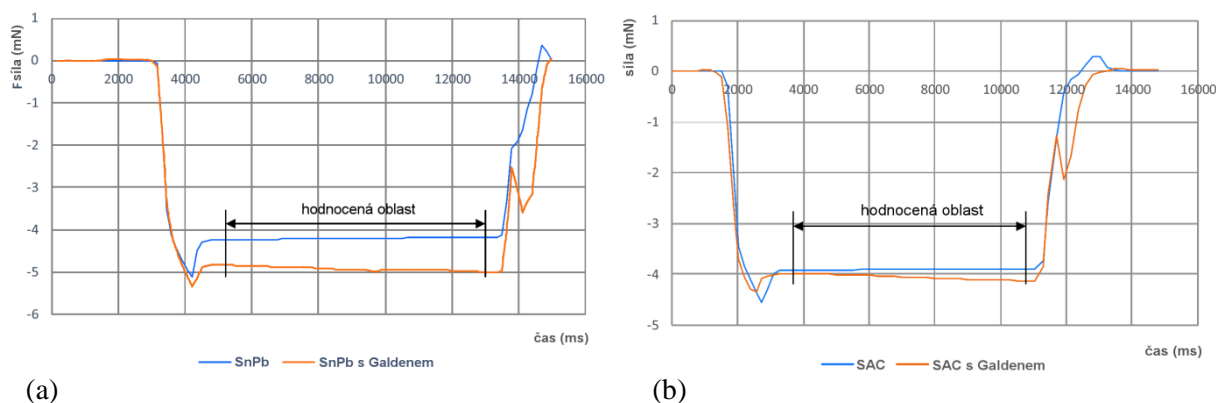
Obr. 77: Měření smáčecí síly GaldenuLS 230 při různých hloubkách ponoru zkušební tyčinky z křemičitého skla. [41]

4.2.2 Naměřené výsledky experimentu

Na SMD součástky osazené na desce plošného spoje působí při pájení smáčecí síly a povrchové napětí, které mohou být díky nedokonalostem na hranici rovnováhy, aby udržely součástku v původní poloze. Pokud do tohoto nestabilního systému přidáme další složku v podobě pájecí kapaliny, která v menší či větší míře může interagovat s okolím, může narušit křehkou rovnováhu sil a tím součástku vysunout z původní polohy; narůstá tak počet chyb při pájení. Připravený experiment se měl této situaci přiblížit a posoudit vliv pájecí kapaliny na tombstoning.

Naměřené výsledky prokázaly významný účinek Galdenu na velikost výsledných smáčecích sil jak u olovnaté pájecí slitiny (Sn63Pb37), tak u bezolovnaté pájky (SAC 387). Zobrazené křivky v grafu měřené s Galdenem a bez Galdenu vykazují ve svém středu výraznou rovinnou oblast a rozdíly mezi těmito křivkami odhalují změny ve smáčecích silách.

Pájecí kapalina Galden se během měření odpařovala, proto byl kladen důrazný zřetel na udržování stále stejné základní výšky hladiny před zahájením každého měření.

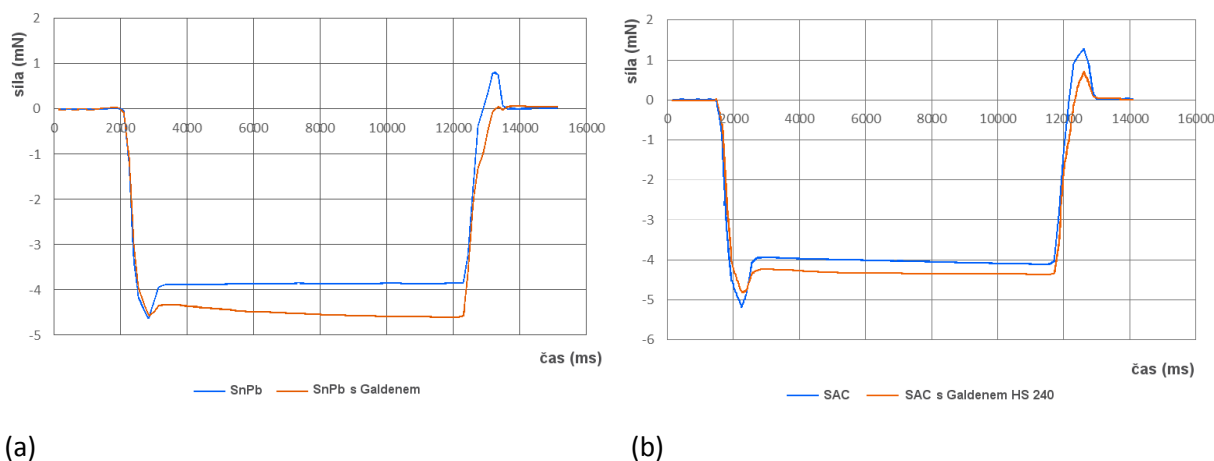


Obr. 78: Graf zobrazující křivky smáčení samostatné pájecí slitiny a slitiny s Galdenem LS 230 při 235 °C: (a) pro Sn63Pb37, (b) pro SAC 387. [41]

Ačkoli Galden viditelně smáčí použitý typ vzorku, výsledná měřená síla vypovídá o nesmáčivém charakteru obou látek. Potvrzuje to tedy předpoklad negativního působení pájecí kapaliny na proces pájení z pohledu vzniku tombstoningu. Velikost tohoto působení přibližují výsledky měření. Pro kvantifikaci rozdílů mezi jednotlivými měřeními byla použita horizontální křivka v oblasti střední části průběhu. V případě olovnaté pájecí slitiny byla křivka s Galdenem o 20 % pod úroveň oblasti křivky s čistou pájkou, což představuje v absolutní hodnotě přibližně 0,5 mN pro hloubku ponoru vzorku 5 mm. Podobně byla také naměřena odchylka mezi křivkami s Galdenem a bez Galdenu u bezolovnaté slitiny SAC, kde rozdíl mezi středy hodnocených oblastí byl přibližně 5 %. [41]

Takovýto rozdíl mezi oběma křivkami nemůže být způsoben pouze změnou vztahové síly, kterou způsobují přidané dva milimetry (0,8 ml) pájecí kapaliny na hladině roztavené pájky; nehledě k čtyřnásobně nižší hustotě Galdenu vůči pájecí slitině (viz Tab. 2). Také velikost vztahové síly způsobené přítomností Galdenu není konstantní a v čase se snižuje vlivem odpařování. Oba tyto jevy je možné zcela zanedbat, jelikož velikost smáčecí síly získaná během měření s čistým Galdenem dosahuje pouze 3 % průměrné smáčecí síly naměřené s čistou pájecí slitinou (viz Obr. 77).

Další fáze experimentu směřovala na pájecí kapalinu s vyšší teplotou varu Galden HS 240 zahřívány na teplotu 245 °C. Měření bylo opakováno se stejným postupem jako v předchozím případě. Výsledky získané z měření potvrdily, že pájecí kapalina hraje důležitou roli u smáčecích sil (povrchového napětí). Rozdíl smáčecích sil působících na vzorek ponořený do Sn-Pb pájky je přibližně 19,7 % (0,73 mN v absolutní hodnotě) a pro pájecí slitinu SAC je naměřený rozdíl 7,9 % (0,34 mN v absolutní hodnotě); průběhy smáčecích sil jsou uvedeny níže na grafech. [41]



(a)

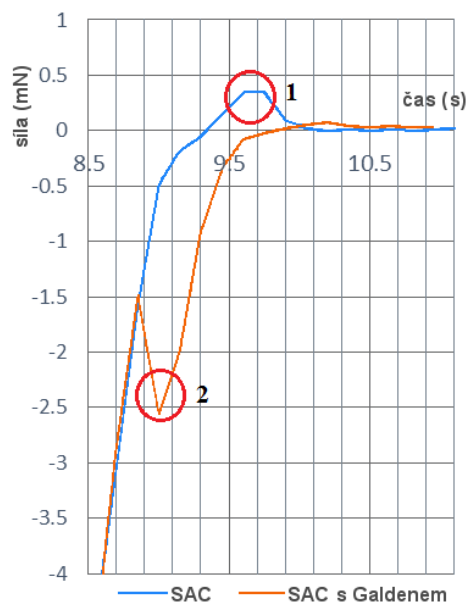
(b)

Obr. 79: Graf zobrazující křivky smáčení samostatné pájecí slitiny a slitiny s Galdenem HS 240 při 245 °C: (a) pro Sn63Pb37, (b) pro SAC 387. [41]

Zaměříme-li se na hodnocenou oblast u grafů s Galdenem (viz Obr. 79), je patrné, že průběh není konstantní, ale vykazuje sklon; to je způsobeno kapilárními silami a kondenzací výparů pájecí kapaliny, čímž roste velikost kónické plochy okolo skleněné tyčinky (viz Obr. 74 (b)) a Galdenu narůstá smáčivost. Kondenzace pájecí kapaliny zároveň mění tvar této kónické oblasti a ta dále pod sebou ovlivňuje hladinu roztavené pájecí slitiny. A pokud přihlídneme ke skutečnosti, že povrch pájky byl v kontaktu s Galdenem a nikoli se vzduchem, došlo ke změně vektorů povrchového napětí (jak zobrazuje Obr.31). Tyto skutečnosti vedly ke snížení změřené smáčecí síly.

Další významnou částí grafu s přítomností Galdenu je zákmit (či zub), který se objevuje v poslední fázi křivky. Tento zákmit objevující se při měření smáčivosti pájecí slitiny v kombinaci s Galdenem při vytahování zkušební vzorku byl způsoben vzájemnou interakcí mezi Galdenem, roztavenou pájkou a zkušební tyčinkou z křemičitého skla. V ten okamžik se změnila smáčivé vlastnosti pájecí kapaliny, která díky své hmotnosti působila na hladinu pájecí slitiny. Tato interakce v průběhu měření (při vytahování vzorku z lázně) velmi často způsobovala výskyt jednoho či více zákmitů na křivce grafu. Přítomnost vícečetných zubů na křivce byla snadno pozorovatelná, pokud během procesu vytahování zkušební tyčinky byla hladina rozhoupána a došlo k vícenásobnému kontaktu hladiny se vzorkem s následným odtržením. Pokud byl vzorek vytahován z roztavené pájky bez přítomnosti Galdenu, pak vznikl pouze jeden vrchol na grafickém průběhu, a to v okamžiku, kdy vzorek opustil hladinu roztavené slitiny. [41]





Obr. 80: Závěrečná fáze smáčecí charakteristiky s vyznačenou oblastí zákmitů pro měření bez Galdenu (bod 1) a s Galdenem LS 230 (bod 2). [41]

Popsaný jev zaznamenaný na křivce však nemá žádný vliv na hodnocenou oblast ve střední části průběhu měřené smáčecí síly, a to jak pro samotné pájecí slitiny, tak i slitiny v kombinaci s pájecí kapalinou (Galdenem).

5. SHRNU TÍ DOSAŽENÝCH POZNATKŮ

Pájecí slitina, na první pohled kovově lesklý, hladký a tvrdý materiál, který při překročení patřičné teploty ohřevem změní své skupenství (na kapalné) a přerušением dodávky tepla zchladne a vrátí se do původního pevného stavu. Jde tedy o základní charakter každé pájecí slitiny, který pojmáme jako zcela běžnou a rutinní vlastnost, na jejíž podstatě je postaven pájecí proces. Z bližšího pohledu se v rámci jednoho teplotního cyklu ve slitině odehrávají četné nepatrné události, které utvářejí výslednou strukturu a charakter celé hmoty, jež působí na své okolí. Cílem práce bylo zmapovat alespoň rámcové teplotní chování pájecích slitin v podobě vodivého spoje na DPS a jeho vlivu na bezprostřední okolí a s tím spojené chyby při procesu pájení.

Základní poznatek vyplynul z měření samostatného pájeného bodu, na němž byla pozorována přítomnost termického jevu – latentního tepla a jeho základního charakteru. Jeho přítomnost nalezneme jak v oblasti skupenské přeměny z pevné do kapalné, tak z kapalné do pevné. Avšak z hlediska intenzity ovlivňování okolí v elektrotechnice je podstatnější oblast tuhnutí. Vstupuje-li teplota pájky do této oblasti, vstoupí nejprve do oblasti podchlazení, kdy teplota kapalné fáze je nižší než samotná teplota tuhnutí, vzápětí je uvolněno latentní teplo, které se po určitou dobu snaží zachovávat téměř konstantní teplotou slitiny (velký význam hraje typ slitiny) na pomezí pevné a kapalné fáze. Po uvolnění veškerého latentního tepla teplota slitiny dále přirozeně klesá s ohledem na teplotu okolí.

Z hlediska tvaru křivky jsou patrné odlišnosti u různých typů slitin. Výrazný vliv na rychlost šíření tepla u zkoušeného materiálu má tepelná vodivost jednotlivých složek a jejich vzájemný poměr ve slitině. S četností základních složek roste i složitost systému, proto slitina při ochlazování prochází různými fázemi uspořádání v rámci rovnovážného diagramu a v každém okamžiku může uvolňovat jiné množství tepla. Slitina rovněž vytváří v kontaktu s další složkou intermetalické sloučeniny, jejichž termické vlastnosti vstupují do teplotního průběhu uvolňovaného latentního tepla a mění jej.

Detailnější měření slitiny uzavřené v měřicím kontejneru, který simuluje zvětšenou verzi pájeného spoje, přineslo bližší pohled na rozložení teplot v objemu slitiny. Měření bylo realizováno na olovnaté slitině a třech bezolovnatých pájkách. Třetí Bi-Sn pájecí slitina byla zvolena pro svou nízkou teplotu tání. Při porovnání oblasti tuhnutí u jednotlivých slitin je



možno odvodit odlišnou rychlost šíření tepla na základě výše uvedených podmínek. Nejlépe je jev pozorovatelný v oblasti podchlazení, z něhož teplota opět roste vlivem uvolňování latentního tepla. Gradient nárůstu vnitřních teplot potvrzuje vliv tepelné vodivosti a poměr jednotlivých složek ve slitině. Především u slitiny SAC je patrný výrazný nárůst teploty, který vzápětí klesá na stabilní teplotní hladinu jako u ostatních dvoukomponentních slitin. U bezolovnatých slitin se také projevují termické nehomogenity při ohřevu slitiny (změny z pevné do kapalně fáze). Důvodem anomálií se předpokládá přítomnost intermetalických sloučenin a nejednotného bodu tání slitiny v celém objemu. Na teplotní výkyvy v oblastech fázových změn má vliv také rychlost ohřevu a chlazení. Čím rychlejší změna okolní teploty vzorku, tím dynamičtější je její projev uvnitř pájecí slitiny. Proto i rychlost technologického procesu pájení má velký vliv na výsledný výskyt chyb.

Významný jev se odehrává v oblasti tuhnutí (změna skupenství z kapalně na pevně). Ve chvíli, kdy teplota slitiny sestoupí do oblasti podchlazení a následně opět vzrůstá (jednotlivé teplotní sondy rozmístěné uvnitř slitiny neměří zcela totéž), je nárůst teplot v každém měřeném bodě časově posunut, což je při šíření tepla materiálem s reálnou tepelnou vodivostí přirozené. Avšak zde je postup opačný. Znamená to tedy, že pájecí slitina začíná tuhnout od středu a nikoli od kraje, jak bylo předpokládáno. Toto tepelné chování se opakuje u všech měřených slitin. Příčina a důvod tohoto chování není zcela známa a je předmětem dalšího zkoumání.

V případě opětovného návratu k makroskopickému pohledu na základní uspořádání pájeného bodu a pro představu reálné aplikace byl zkoumaný bod umístěn do bezprostřední blízkosti totožného bodu a následně byla měřena jejich vzájemná interakce. Jsou-li pájené body mezi sebou vzájemně propojeny vodivou cestou, vzájemná interakce mezi nimi je vysoká. Měděná vodivá cesta vytváří tepelně velmi rychlou spojnicí mezi oběma pájenými body. Proto uvolněním latentního tepla v okamžiku tuhnutí slitiny prvního pájeného bodu je velmi výrazně ovlivňován druhý bod, který zahájil svoji změnu skupenství o zlomek vteřiny později, ale předáním tepla od prvního bodu je jeho teplota výrazně vyšší než u bodu prvního.

Podobné chování vykazuje i situace dvou totožných pájených bodů umístěných vedle sebe, které jsou propojené SMD součástkou. SMD součástka - rezistor se chová podobně jako měděná vodivá cesta a vytváří „most“ mezi oběma body. V obou případech dochází k nerovnoměrnému tuhnutí bodů. V případě osazeného rezistoru i k nerovnoměrnému



působení smáčecích sil na součástku, čímž narůstá pravděpodobnost vzniku chyby při pájení – tombstoningu.

Příčinou nárůstu chyb při procesu pájení může být i zvolená technologie. Jednou takovou je metoda, která využívá pro přenos tepla kondenzaci par (pájení v parách). Použitá technologie využívá k přenosu tepla pájecí kapalinu (Galden), jejíž přítomnost v oblasti pájeného bodu mění výsledné povrchové napětí pájecí slitiny. Pájecí kapalina na povrchu pájky zvyšuje povrchové napětí a tím zvyšuje pravděpodobnost vzniku tombstone efektu. Dojde-li tedy k roztavení pájecí slitiny na základě ohřevu kondenzující pájecí kapalinou, jež je přítomna v oblasti pájeného spoje, rostoucí povrchové napětí sníží smáčecí sílu a zhorší tak podmínky vzniku pájeného spoje. V kombinaci s předchozí situací riziko zvednutí součástky narůstá ještě více.

Na základě nashromážděných výsledků z jednotlivých realizovaných experimentů je možné konstatovat, že sama pájecí slitina svými vlastnostmi vytváří nestabilitu pájecího procesu a jeho úpravou ji lze omezit. Zvláště je nutno k tomu přihlídnout v době, kdy je miniaturizace součástek na vzestupu.



6. SEZNAM POUŽITÝCH MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ

Zařízení	Výrobce	Typ
Laboratorní váhy	Mettler Toledo	AG 245s
Průběžná horkovzdušná pec	Technoprint, Ermelo	Mistral 260
automatický sedmikanálový datalogger	KIC ON BORD	Explorer
Termoelektrické sondy	Omega	5TC-GG-K-36-72
Klimatická komora	WEISS Umwelttechnik GmbH	WK3-100070
Šoková komora	WEISS Umwelttechnik GmbH	TS 120-M
DSC aparatura	SETARAM Instrumentation, Caluire	SETSYS Evolution 24
Aparatura na měření smáčivosti	GEC	Mk6A



7. LITERATURA

- [1] F. C. Campbell, *Phase Diagrams: Understanding the Basics*. ASM International, 2012.
- [2] L. Ptáček a kol., *Nauka o materiálu I*, Vydání 1., roč. 2003. Akademické nakladatelství CERM s.r.o.: Akademické nakladatelství CERM s.r.o.
- [3] S. Cherukuvada a A. Nangia, „Eutectics as improved pharmaceutical materials: design, properties and characterization“, *Chem. Commun.*, roč. 50, č. 8, s. 906–923, pro. 2013.
- [4] „MiCorr“. [Online]. Dostupné z: <https://micorr.org/scientific-bases/>. [Viděno: 06-čer-2019].
- [5] R. L. J. M. Ubachs, P. J. G. Schreurs, a M. G. D. Geers, „Microstructure Evolution of Tin–Lead Solder“, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, roč. 27, č. 4, s. 635–642, pro. 2004.
- [6] K. J. Puttlitz a K. A. Stalter, *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. CRC Press, 2004.
- [7] Y. Zhu a F. Sun, „Effect of Solder Joint Thickness on Intermetallic Compound Growth Rate of Cu/Sn/Cu Solder Joints During Thermal Aging“, *J. Electron. Packag.*, roč. 138, č. 4, s. 041005-041005–5, říj. 2016.
- [8] J. P. Lucas, H. Rhee, F. Guo, a K. N. Subramanian, „Mechanical properties of intermetallic compounds associated with Pb-free solder joints using nanoindentation“, *J. Electron. Mater.*, roč. 32, č. 12, s. 1375–1383, pro. 2003.
- [9] „Montáž v elektronice : pouzdření aktivních součástek, plošné spoje / Pavel Mach, Vlastimil Skočil, Jan Urbánek; Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3“. [Online]. Dostupné z: <https://katalog.vsb.cz/documents/60388?locale=cs>. [Viděno: 26-kvě-2019].
- [10] H. R. Kotadia, P. D. Howes, a S. H. Mannan, „A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 54, č. 6, s. 1253–1273, čer. 2014.
- [11] R. Prasad, *Surface Mount Technology: Principles and Practice*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [12] C. Hang, J. He, Z. Zhang, H. Chen, a M. Li, „Low Temperature Bonding by Infiltrating Sn3.5Ag Solder into Porous Ag Sheet for High Temperature Die Attachment in Power Device Packaging“, *Sci. Rep.*, roč. 8, č. 1, s. 17422, lis. 2018.
- [13] L. Yang, S. Fenglian, Z. Hongwu, a W. Yang, „Influence of Ag, Cu and additive Bi elements on the thermal property of low-Ag SAC solder alloys“, *Proc. 2011 6th Int. Forum Strateg. Technol.*, roč. 1, s. 72–75, 2011.
- [14] J. Morral, *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 233 SPRING ST, NEW YORK, USA, NY, 10013: Springerlink, 1998.
- [15] H. Okamoto, „Bi-Sn (Bismuth-Tin)“, *J. Phase Equilibria Diffus.*, roč. 31, č. 2, s. 205–205, dub. 2010.



- [16] Beneš Ladislav, „Materiálem letem světem“, *Výukový Materiál ČVUT V Praze Fak. Strojní Úst. Materiálového Inž.*, s. 277.
- [17] D. Klauberová, „OPTIMALIZACE PROCESU PÁJENÍ MĚDĚNÝCH KOMPONENT GENERÁTORU“, s. 7, 2007.
- [18] I. Ohnuma a K. Ishida, „PHASE DIAGRAMS AS TOOLS FOR ADVANCED MATERIALS DESIGN- APPLICATIONS TO NON-FERROUS ALLOYS“, *Tecnol. Em Metal. Mater. E Min.*, roč. 13, č. 1, s. 46–63, 2016.
- [19] J.-C. Zhao, *Methods for Phase Diagram Determination*. Elsevier, 2007.
- [20] M. Pokorný, „Sálání tepla“. Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, 2006.
- [21] „Sdílení tepla“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra technických zařízení budov, 2011.
- [22] M. Pokorný, „Vedení tepla“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra technických zařízení budov, 2006.
- [23] V. Vydra, „Termomechanika - Přednášky“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra fyziky, Fakulta stavební, 2018.
- [24] P. J. Kay a C. A. Mackay, „Barrier Layers Against Diffusion“, *Trans. IMF*, roč. 57, č. 1, s. 169–174, led. 1979.
- [25] T. Siewert, L. Stephen, D. R. Smith, a J. C. Madeni, „Properties of Lead-Free Solders“. National Institute of Standards and Technology & Colorado School of Mines, 2002.
- [26] J. Podzemský, „Degradace spojů pájených pájkami bez olova“, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie, 2015.
- [27] P. T. Vianco, P. F. Hlava, a A. C. Kilgo, „Intermetallic compound layer formation between copper and hot-dipped 100In, 50In-50Sn, 100Sn, and 63Sn-37Pb coatings“, *J. Electron. Mater.*, roč. 23, č. 7, s. 583–594, čvc. 1994.
- [28] A. J. Sunwoo, J. W. Morris, a G. K. Lucey, „The growth of Cu-Sn intermetallics at a pretinned copper-solder interface“, *Metall. Trans. A*, roč. 23, č. 4, s. 1323–1332, dub. 1992.
- [29] X. J. Sheng, Han Ding, Y. H. Yin, a Y. P. Wu, „A reflow soldering retro-design system for rework station based on Q-factor“, in *Proceedings of 2005 International Conference on Asian Green Electronics, 2005. AGEC.*, 2005, s. 51–58.
- [30] P. L. Tu, Y. C. Chan, K. C. Hung, a J. K. L. Lai, „Study of micro-BGA solder joint reliability“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 41, s. 287–293, 2001.
- [31] „Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu spoje; Ing. Milan Dosedla (2012 - 67073) – VUT v Brně“. [Online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/67073?aid_redir=1. [Viděno: 03-čer-2019].
- [32] M. Mejzlík, „Návrh a tvorba laboratorní úlohy s Peltierovým článkem“, *Design and construction laboratory exercise with Peltier cell*, čer. 2009.
- [33] B. Jaromír, „Svařování termočlánků mikroplazmou“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra fyziky, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, srp-2016.



- [34] Unknown, „Aldi27X’s Blog: Termokopel“, *Aldi27X’s Blog*, dub-2015. [Online]. Dostupné z: <http://aldi27x.blogspot.com/2015/04/termokopel.html>. [Viděno: 03-čer-2019].
- [35] V. Mentlík, *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [36] M. Ian Pope a E. D Judd, „Differential thermal analysis : a guide to the technique and its applications / M.I. Pope, M. D. Judd“, *SERBIULA Sist. Libr.* 20, čer. 2019.
- [37] P. Štarha a Z. Trávníček, „Termická analýza“. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra anorganické chemie, 2011.
- [38] „Diferenciální skenovací kalorimetrie“. Vysoká škola chemickotechnologická, Fakulta chemicko-inženýrská.
- [39] I. M. P. R. Garcia, *IPC-A-610 Acceptability of Electronic Assemblies*, 1. vydání., roč. april 2010. IPC.
- [40] B. D. Růžička, „Studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájeném spoji“. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie, 2014.
- [41] K. Dušek, D. Bušek, M. Plaček, A. Géczy, O. Krammer, a B. Illés, „Influence of vapor phase soldering fluid Galden on wetting forces (tombstone effect)“, *J. Mater. Process. Technol.*, roč. 251, s. 20–25, led. 2018.
- [42] K. Dusek a J. Urbanek, „Influence of the reduced oxygen concentration on the wetting force“, in *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2006, s. 193–196.
- [43] K. Dusek, M. Placek, D. Busek, K. Dvořáková, a A. Rudajevová, „Study of influence of thermal capacity and flux activity on the solderability“, in *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2014, s. 185–188.
- [44] P. Harant a F. Steiner, „Solderability of lead-free surface finished PCB“, in *2007 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2007, s. 388–392.
- [45] T. Novak a F. Steiner, „Surface roughness influence on solderability“, in *2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2009, s. 1–6.
- [46] K. Dusek a J. Urbanek, „Surface tension measurement of the solders by non-wetting specimen“, in *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, Budapest, Hungary, 2008, s. 354–357.
- [47] B. Illés a A. Géczy, „Investigating the dynamic changes of the vapour concentration in a Vapour Phase Soldering oven by simplified condensation modelling“, *Appl. Therm. Eng.*, roč. 59, č. 1, s. 94–100, zář. 2013.
- [48] K. Witek, A. Skwarek, a B. Kinga Synkiewicz, „Voids investigation in solder joints performed with vapour phase soldering (VPS)“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 26, č. 1, s. 8–11, led. 2014.
- [49] O. Krammer a T. Garami, „Investigating the mechanical strength of Vapor Phase soldered chip components joints“, in *2010 IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2010, s. 103–106.
- [50] J. Villain, M. Beschorner, H. J. Hacke, B. Brabetz, a J. Zapf, „Formation, distribution and failure effects of voids in vapor-phase soldered small solder volumes“, in



- Proceedings International Symposium on Advanced Packaging Materials Processes, Properties and Interfaces (Cat. No.00TH8507)*, 2000, s. 141–144.
- [51] O. Kouba, „Dutiny v pájených spojích“. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření, 2016.
- [52] A. Géczy, P. Szőke, Z. Illyefalvi-Vitéz, M. Ruzinkó, a R. Bunea, „Soldering profile optimization for vapour phase reflow technology“, in *2011 IEEE 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2011, s. 149–152.
- [53] I. Plotog, G. Varzaru, a P. Svasta, „VPS technology and applications“, in *2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 2010, s. 351–354.
- [54] I. Plotog, G. Varzaru, C. Turcu, T. Cucu, a N. Codreanu, „DFM SOLUTIONS FOR TOMBSTONING IN VAPOUR PHASE SOLDERING TECHNOLOGY BASED ON THE RESEARCH PROJECT Contract CEEX-X2C09“, kvě. 2019.
- [55] K. Dušek, V. Straka, M. Brejcha, a I. B. Pelikánová, „Influence of type of reflow technology and type of surface finish on tomb stone effect“, in *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2013, s. 132–135.
- [56] H. Leicht a A. Thumm, „Today’s Vapor Phase Soldering An Optimized Reflow Technology for Lead Free Soldering“, s. 5.
- [57] K. Dušek, A. Rudajevová, a M. Plaček, „Influence of latent heat released from solder joints on the reflow temperature profile“, 2016.
- [58] K. Dusek, M. Placek, D. Busek, a A. Rudajevova, „Influence of latent heat on the shape of temperature profile for different types of solder alloys“, in *2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Pilsen, Czech Republic, 2016, s. 214–217.
- [59] A. Pietrikova, P. Mach, J. Durisin, E. Livovsky, a J. Urbancik, „Microstructure analysis and measurement of nonlinearity of vapour phase reflowed solder joints“, in *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2008, s. 363–366.
- [60] N. n. Ekere, H. Da, R. Durairaj, B. Salam, a C. Virseda, „Reflow profile study of the Sn-Ag-Cu solder“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 16, č. 1, s. 27–34, dub. 2004.
- [61] P. Schnederle, M. Adámek, a I. Szendiuch, „Effect of nitrogen atmosphere on the soldering process for different types of lead-free solders“, in *2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2012, s. 201–206.
- [62] K. Dušek, J. Vávra, a A. Rudajevová, „Effect of reflow technology and surface finishes of PCB on solder spreading“, in *Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2013, s. 136–139.
- [63] I. Plotog a M. Vladescu, „Working temperatures influence over the solder joints properties“, in *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2014, s. 231–236.
- [64] B. Illes, O. Krammer, G. Harsanyi, a Z. Illyefalvi-Vitez, „Modelling Heat Transfer Efficiency in Forced Convection Reflow Ovens“, in *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2006, s. 80–85.



- [65] T.-N. Tsai, „Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative study“, *Appl. Soft Comput.*, roč. 12, č. 8, s. 2601–2613, srp. 2012.
- [66] H. Ding, Y. Wu, a J. Gao, „Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 19, č. 1, s. 28–33, úno. 2007.
- [67] F. Ochoa, J. J. Williams, a N. Chawla, „The effects of cooling rate on microstructure and mechanical behavior of Sn-3.5Ag solder“, *JOM*, roč. 55, č. 6, s. 56–60, čer. 2003.
- [68] Y.-S. Kim, K.-S. Kim, C.-W. Hwang, a K. Sukanuma, „Effect of composition and cooling rate on microstructure and tensile properties of Sn–Zn–Bi alloys“, *J. Alloys Compd.*, roč. 352, č. 1, s. 237–245, bře. 2003.
- [69] T. Garami, N. Réti, a O. Krammer, „Controlling the cooling rate of soldering processes with PIC microcontroller“, in *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2014, s. 402–406.
- [70] A. Rudajevová a K. Dušek, „Study of Undercooling and Recalescence During Solidification of Sn62.5Pb36.5Ag1 and Sn96.5Ag3Cu0.5 Solders in Real Electronic Joints“, *J. Electron. Mater.*, roč. 43, č. 7, s. 2479–2486, čvc. 2014.
- [71] W.-L. Chen, C.-Y. Yu, C.-Y. Ho, a J.-G. Duh, „Effects of thermal annealing in the post-reflow process on microstructure, tin crystallography, and impact reliability of Sn–Ag–Cu solder joints“, *Mater. Sci. Eng. A*, roč. 613, s. 193–200, zář. 2014.
- [72] „Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-silver Lead-free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging - ScienceDirect“. [Online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030212600231>. [Viděno: 04-kvě-2019].



8. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1:** (a) fázový diagram eutektické slitiny cínu a olova. Poměr cínu a olova 61,9: 38,1 vykazuje svou charakteristikou velmi nízký bod tání ($183\text{ }^{\circ}\text{C}$) na rozdíl od základních složek (cín = $232\text{ }^{\circ}\text{C}$, olovo = $327\text{ }^{\circ}\text{C}$); (b) ukázka tuhnutí a vzniku pevného roztoku cín-olovnaté eutektické slitiny; (c) Deskové uspořádání složek α a složek β cín-olovnaté slitiny. Atomy olova z tekuté fáze primárně difundují do desky α a atomy cínu do složky β ; (d) fotografie struktury cín-olovnatého eutektika...**14**
- Obr. 2:** Fázový diagram cín-olovnaté slitiny. Ukázka změny krystalické struktury při tuhnutí mimo eutektický bod – 40% obsahu složky Sn.....**15**
- Obr. 3:** Zachycení změny mikrostruktury cín-olovnaté slitiny s postupným nárůstem obsahu cínu.....**16**
- Obr. 4:**Fázový diagram cínu (Sn) s mědí (Cu).....**17**
- Obr. 5:** Vliv přítomnosti niklu v eutektické slitině Sn-Cu [3].....**18**
- Obr. 6:** Rovnovázný diagram slitiny cínu (Sn) a mědi (Cu).....**19**
- Obr. 7:** Fázový diagram slitin skupiny SAC: (a) rovnovážný fázový diagram složek Sn, Ag, Cu, (b) detailní část fázového diagramu zobrazující oblast se slitinami SAC 305, SAC 387 a SAC 405**20**
- Obr. 8:** Fázové diagramy a v nich naznačené slitiny skupiny SAC: (a) fázový diagram cínu (Sn) s mědí (Cu), (b) fázový diagram cínu (Sn) se stříbrem (Ag).**20**
- Obr. 9:** Fázový diagram slitiny Sn-Bi**22**
- Obr. 10:** Schématické znázornění mezifázového chování Sn-Bi slitiny na měděném substrátu (a) Sn-5Bi/Sn-15Bi; (b) Sn-30Bi/Sn-40Bi; and (c) Sn-58Bi solder joints**23**
- Obr. 11:** Příklad fázových diagramů: (a) rovnovážný tetrahedronární diagram Sn-Ag-Cu-Ni při 210°C , (b) Ternární diagram základních systémů Sn – fáze likvidu.....**24**
- Obr. 12:** Teplotní profil pájecí slitiny Sn63Pb37 s projevy latentního tepla při ohřevu a tuhnutí.....**25**
- Obr. 13:** (a) Ideální teplotní profil desky plošných spojů (FR4) bez přítomnosti projevu latentního tepla. (b)Příklad teplotního profilu desky plošného spoje (FR4) s 25mg pájecí slitiny Sn60Pb40 na povrchu pájecí plošky**26**
- Obr. 14:** (a) Graf teploty v závislosti na čase zobrazuje fázi podchlazení čistého cínu. Je zde zobrazena teplota povrchu vzorku, referenční teplota a teplota uvnitř pájecí slitiny. Před ztuhnutím slitiny se na průběhu projevuje výrazné podchlazení, které způsobilo velmi rychlý a krátkodobý nárůst teploty. (b) Přidružený graf DTA pro oba termočlánky; hmotnost měřeného vzorku slitiny 163,2 mg, rychlost ohřevu 5K/min.....**27**
- Obr. 15:** Uvolňování tepelné energie z lokálních nukleačních center a její šíření do prostoru. Centra se začínají tvořit od povrchu směrem ke středu a uvolňují do okolí energii, která je částečně odváděna povrchem a částečně spotřebována na opětovné vrácení slitiny do kapalného stavu v kterém setrvává po patřičnou dobu.....**28**
- Obr. 16:** Rozklad dopadajícího záření na jednotlivé složky při dopadu na pevnou látku**29**
- Obr. 17:** Schematické uspořádání pájecích bodů na DPS**30**
- Obr. 18:** Schematické uspořádání pájecích bodů na DPS a možných cest pro vedení tepla**31**
- Obr. 19:** Mikroskopický snímek oblasti rozhraní měděné vrstvy (Cu) a vrstvy eutektické slitiny Sn63Pb37, kde se po 400 dnech při $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ vytvořily vrstvy intermetalických sloučenin. Kay, P.; Mackay, C. Barrier layers against diffusion. Trans. Inst. Met. 1979, 57, 169–174.**33**
- Obr. 20:** Graf zobrazující závislost přírůstku celkové tloušťky intermetalické vrstvy ($\eta + \varepsilon$) na čase pájecí slitiny Sn63Pb37 Vianco, P.; Hlava, P.; Kilgo, A. Intermetallic compound layer formation between



copper and hotdipped 100In, 50In–50Sn, 100Sn, and 63Sn–37Pb coatings. J. Electron. Mater. 1994, 23, 583.	34
Obr. 21: Mikroskopický snímek oblasti hranice mědi (Cu) a eutektické slitiny Sn63Pb37 s vyrůstající vrstvou intermetalické sloučeniny. Přetavení slitiny bylo provedeno při 215°C po dobu (a) 5 s, (b) 60 s, (c) 300s, (d) 900 s Sunwoo; Morris, J.; Lucey, G. The growth of Cu–Sn intermetallics at a pretinned copper–solder interface. Metall. Trans., A 1992, 23, 1323–1332.	35
Obr. 22: Principiální znázornění odečtu parametrů pro výpočet celkového $Q\eta$ symbolizovaného oranžovou plochou – „Heating faktor“	36
Obr. 23: Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na $Q\eta$	37
Obr. 24: Schematické uspořádání termočlánku	38
Obr. 25: Charakteristiky jednotlivých typů termočlánků	39
Obr. 26: Schematické znázornění termočlánku: (a) barevné označení vodičů, (b) nechráněný spoj, (c) tupý svar.	39
Obr. 27: Dva typy měřicích zařízení DSC: (a) výkonově kompenzované DSC a (b) heat-flux DSC. S – vzorek; R – referenční materiál.	40
Obr. 28: Chování křivek TG a DSC při různých fyzikálně chemických procesech	41
Obr. 29: Příklad křivky měřící metody DSC	41
Obr. 30: (a) Příklad Tombstone efektu na součástce. (b) Síly působící na součástku při „Tombstouningu“ ; F1 - ovlivněna pouze rozměry součástky a její hmotností, F2 – smáčecí síla vyvolaná povrchovým napětím roztavené pájky v opačném směru než F3, její velikost ovlivňuje přesah la., F3 – smáčecí síla vyvolaná povrchovým napětím roztavené pájky, její velikost ovlivňuje přesah lb a způsobuje nadzvednutí součástky.	42
Obr. 31: Schematické znázornění povrchového napětí (rovnováha smáčivosti): (a) dobré smočení – ostrý úhel θ , (b) špatně smáčivý povrch – tupý úhel θ	44
Obr. 32: Schematické znázornění: (a) chování smáčivého vzorku, (b) chování nesmáčivého vzorku při ponoření do pájecí slitiny	45
Obr. 33: Princip měření smáčivé síly ponoření měřeného vzorku do roztavené pájky – profil Fsm: (a) pro smáčivý, (b) pro nesmáčivý vzorek; (c) meniskograf – měřící aparatura	46
Obr. 34: Technologie pájení v parách: (a) příklad malého experimentálního zařízení, (b) schematické znázornění principu pájení v parách[3].	47
Obr. 35: Pracovní kapalina Galden (PFPE - perfluorpolyether)	48
Obr. 36: Znázornění měřicí desky: (a) schematické znázornění celé desky, (b)detail desky.	50
Obr. 37: Schematické uspořádání měřícího přípravku	51
Obr. 38: Použití technologie při měření: (a) průběžná horkovzdušná pec MISTRAL 260 pro ohřev vzorků, (b) záznam teplotního profilu - profilometr typu KIC ON BORD – Explorer a softwaru KIC 2000, version 2.6.0.0.	51
Obr. 39: Celý teplotní profil eutektické pájecí slitiny Sn63Pb37	52
Obr. 40: Výsledek naměřeného teplotního profilu slitiny Sn63Pb37 při chladnutí - uvolnění latentního tepla do prostoru.	53
Obr. 41: Přípravek pro měření dvou samostatných pájecích bodů: (a) schéma uspořádání, (b) vzorek	53
Obr. 42: Teplotní profil dvou samostatných pájecích bodů bezolovnaté pájecí slitiny SAC 305 – působení generovaného latentního tepla mezi body.	55
Obr. 43: Porovnání průměrných teplotních profilů dvou nepropojených pájecích bodů bezolovnatých pájecích slitin (SAC 305, Sn99,3Cu0,7 a Sn96,5Ag3,5) s olovnatou pájecí slitinou Sn63Pb37 – zobrazena fázová změna z kapalného do pevného skupenství.	56



Obr. 44: Nákras zkušebního zařízení pro měření teplotních průběhů uvnitř pájecí slitiny	57
Obr. 45: Trojrozměrný model kontejneru pro měření pájecí slitiny.....	57
Obr. 46: Komponenty měřicího kontejneru: (a) řez víkem kontejneru, (b) měřicí sonda procházející víkem kontejneru.	58
Obr. 47: Schematické uspořádání měřicí sestavy při ohřevu	59
Obr. 48: Teplotní profil pájecí slitiny Sn63Pb37 měřený v nerezovém kontejneru (1. cyklus).....	60
Obr. 49: Průběh teplot pájecí slitiny Sn63Pb37 v oblasti tání (1. cyklus).....	61
Obr. 50: Toroidní jádro tlumivky z amorfního kovu použité pro snížení vlivu rušení.....	62
Obr. 51: Průběh teplot pájecí slitiny Sn63Pb37 v oblasti solidifikace (1. cyklus)	62
Obr. 52: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) v oblasti solidifikace (1. cyklus).....	63
Obr. 53: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) v oblasti solidifikace (3. cyklus).....	64
Obr. 54: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) v oblasti tání (cyklus 1., 2. a 3.)	65
Obr. 55: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Ag (96,5Sn3,5Ag) v oblasti tání (cyklus 1., 2. a 3.)	65
Obr. 56: Teplotní profil pájecí slitiny Sn-Bi při řízeném ohřevu a chlazení – rychlost ohřevu /ochlazení 0,01 °C/s.....	66
Obr. 57: Teplotní profil pájecí slitiny Sn-Bi při skokové změně mezi teplotními úrovněmi +170 °C a -20 °C	67
Obr. 58: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti tání při řízeném ohřevu a chlazení.....	67
Obr. 59: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti tání při skokové změně mezi teplotními úrovněmi +170 °C a -20 °C.....	68
Obr. 60: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti solidifikace při řízeném ohřevu a chlazení: (a) celý průběh solidifikace, (b) detail	68
Obr. 61: Průběh teplot pájecí slitiny Sn-Bi v oblasti solidifikace při skokové změně mezi teplotními úrovněmi +170 °C a -20 °C.....	69
Obr. 62: Schematické uspořádání přípravku pro měření latentního tepla	69
Obr. 63: Dva teplotní profily vzorku bez pájecí slitiny (vzorek 1) a dva teplotní profily vzorku s jednou obsazenou pájecí ploškou (slitina SAC 305): (a)celý teplotní profil, (b) detail fázových změn teplotního profilu. [5].....	70
Obr. 64: Teplotní rozdíl mezi sledovanými body v oblasti tuhnutí slitiny SAC 305 vzorku 2 [5].....	71
Obr. 65: Dva teplotní profily vzorku bez pájecí slitiny (vzorek 1) a dva teplotní profily vzorku se dvěma obsazenými pájecími ploškami (slitina SAC 305): (a)celý teplotní profil, (b) detail fázových změn teplotního profilu. [5].....	71
Obr. 66: Ukázka teplotního rozdílu mezi sledovanými pájecími body v oblasti tuhnutí slitiny SAC 305 vzorku 3 [5].....	72
Obr. 67: Ukázka teplotního rozdílu mezi sledovanými pájecími body v oblasti tuhnutí slitiny Sn96,5Ag3,5 vzorku 3 [5].....	72
Obr. 68: Schematické znázornění použitých přípravků pro měření teplotních charakteristik metodou DSC..	75
Obr. 69: Použitá měřicí aparatura pro analýzu DSC	75
Obr. 70: Výsledný graf analýzy DSC - závislost tepelného toku na teplotě čisté pájecí pasty SAC 305.....	76
Obr. 71: Graf zobrazující závislost tepelného toku na čase: (a) při ohřevu – tání slitiny, (b) při ochlazení – tuhnutí slitiny	77
Obr. 72: Závislost tepelného toku na teplotě testovaného vzorku se dvěma pájecími body pojícími SMD odpor s DPS	77



- Obr. 73:** Graf tepelného toku v závislosti na čase oblasti tuhnutí slitiny SAC 305 u testovaného vzorku se dvěma pájecími body pojícími SMD odpor s DPS 78
- Obr. 74:** Schematické uspořádání třech kombinací pro měření smáčecí síly: (a) čisté roztavené pájecí slitiny, (b) roztavené pájecí slitiny s vrstvou Galdenu na jejím povrchu, (c) čistého galdenu..... 81
- Obr. 75:** Průběh velikosti smáčecí síly v závislosti na čase pro různé hloubky ponoru (od 0 mm do 9 mm) testovacího vzoru; použitá pájecí slitina SAC 82
- Obr. 76:** Výsledek měření smáčecí síly Galdenu (pájecí kapaliny) při ponoření zkušební skleněné tyčinky: (a) 3 mm, (b) 5 mm..... 83
- Obr. 77:** Měření smáčecí síly Galdenu při různých hloubkách ponoru zkušební tyčinky z křemičitého skla 84
- Obr. 78:** Graf zobrazující křivky smáčení samostatné pájecí slitiny a slitiny s Galdenem LS 230 při 235°C: (a) pro Sn63Pb37, (b) a SAC 387 85
- Obr. 79:** Graf zobrazující křivky smáčení samostatné pájecí slitiny a slitiny s Galdenem HS 240 při 245°C: (a) pro Sn63Pb37, (b) a SAC 387 86
- Obr. 80:** Závěrečná fáze smáčecí charakteristiky s vyznačenou oblastí zákmitů pro měření bez Galdenu (bod 1) a s Galdenem (bod 2) 87



9. SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vybrané parametry základních prvků, pájecích slitin a intermetalických sloučenin34

Tab. 2: Pájecí slitiny a pájecí kapaliny použité v experimentu80



10. SEZNAM ZKRATEK

SnPb	cín-olovnatá pájecí slitina
SnBi	cín-bismutová pájecí slitina
Cu	chemické označení mědi
Bi	chemické označení bismutu
Ag	chemické označení stříbra
Zn	chemické označení zinku
Ni	chemické označení niklu
In	chemické označení india
Au	chemické označení zlata
Pb	chemické označení olovo
Sn	chemické označení cín
Ge	chemické označení germania
Fcc	krychlová mřížka plošně centrovaná
SAC	pájecí slitina na bázi cínu, stříbra a olova
SAC 305	pájecí slitina: 96,5 % cín, 3,0 % stříbro, 0,5 % měď
SAC 387	pájecí slitina: 95,5 % cín, 3,8 % stříbro, 0,7 % měď
SAC 405	pájecí slitina: 96,5 % cín, 4,0 % stříbro, 0,5 % měď
SMT	Surface Mount Technology
SMD	Surface Mount Device
DPS	deska plošných spojů
FR4, (FR-4)	označení kompozitního materiálu složeného ze skleněné tkaniny vyztužené epoxidovou pryskyřicí
IMC	intermetallic compound
BGA	Ball grid array
VPS	Vapor Phase Soldering
FLIP-CHIP	(controlled collapse chip connection) metoda propojování čipů pomocí plošných vývodů na součástkách
HASL	Hot Air Solder Levelling



TČ	termočlánek
DSC	(Differential Scanning Calorimetry) diferenciální skenovací kalorimetrie
DTA	Diferenční termická analýza
STA	Simultánní termická analýza
IR	Infrared radiation
CFC	fluorochlorouhlovodíkové sloučeniny
PFPE	perflorpolyetherové sloučeniny



11. SEZNAM PUBLIKACÍ DISERTANTA

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

- Publikace v impaktovaných časopisech

Dušek, K.; Stancu, C.; Notingher, P.V.; Mach, P.; Plaček, M.

Experimental and Numerical Analysis of Melting and Solidification of SnAgCu Joints
IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2016, 6(9),
ISSN 2156-3950.

Dušek 20 % podíl

Stancu 20 % podíl

Notingher 20 % podíl

Mach 20 % podíl

Plaček 20 % podíl

Veselý, P.; Horynová, E.; Starý, J.; Bušek, D.; Dušek, K.; Zahradník, V.; Plaček, M.; Mach, P. et al.

Solder joint quality evaluation based on heating factor

Circuit World. 2018, 44(1), 37-44. ISSN 0305-6120.

Veselý 9,09 % podíl

Horynová 9,09 % podíl

Starý 9,09 % podíl

Bušek 9,09 % podíl

Dušek 9,09 % podíl

Zahradník 9,09 % podíl

Plaček 9,09 % podíl

Mach 9,09 % podíl

Kučírek 9,09 % podíl

Ježek 9,09 % podíl

Dosedla 9,09 % podíl

Dušek, K.; Rudajevová, A.; Plaček, M.

Influence of latent heat released from solder joints on the reflow temperature profile

Journal of materials science - materials in electronics. 2016, 27(1), 543-549. ISSN 0957-4522.

Dušek 50 % podíl

Rudajevová 34 % podíl

Plaček 16 % podíl



Dušek, K.; Bušek, D.; Plaček, M.; Geczy, A.; Krammer, O.; Illés, B.

Influence of vapor phase soldering fluid Galden on wetting forces (tombstone effect)

Journal of Materials Processing Technology. 2018, 251 20-25. ISSN 0924-0136.

Dušek 40 % podíl

Bušek 40 % podíl

Plaček 5 % podíl

Geczy 5 % podíl

Krammer 5 % podíl

Illés 5 % podíl

- **Publikace ostatní**

Plaček, M.; Dušek, K.; Bušek, D.; Stancu, C.

Temperature distribution during the phase change in the volume of the solder alloy

In: Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology. New York: IEEE Press, 2016. pp. 222-225. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-5090-1389-0.

Bušek, D.; Fazekas, L.; Geczy, A.; Plaček, M.

Substrate influence on temperature distribution along the PCB during vapor phase soldering

In: Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology. New York: IEEE Press, 2016. pp. 267-272. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-5090-1389-0.

Dušek, K.; Plaček, M.; Bušek, D.; Rudajevová, A.

Influence of latent heat on the shape of temperature profile for different types of solder alloys

In: Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology. New York: IEEE Press, 2016. pp. 214-217. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-5090-1389-0.

Ostatní publikace nevztahující se k disertační práci

- **Publikace v impaktovaných časopisech**

Bušek, D.; Dušek, K.; Růžička, D.; Plaček, M.; Mach, P.; Urbánek, J.; Starý, J.

Flux effect on void quantity and size in soldered joints

Microelectronics Reliability. 2016, 60 135-140. ISSN 0026-2714

Bušek 30 % podíl

Dušek 30 % podíl

Růžička 5 % podíl

Plaček 11 % podíl

Mach 5 % podíl

Urbánek 5 % podíl

Starý 14 % podíl

- **Publikace v recenzovaných časopisech**



Plaček, M.; Marcinka, O.; Konečná, Z.; Žák, P.

The Growth of Whiskers on Thick Layers of Lead-Free Solders

Advanced Science, Engineering and Medicine. 2015, 7(7), 300-303. ISSN 2164-6627.

Marcinka, O.; Plaček, M.; Konečná, Z.; Žák, P.

Whiskers Growth on Lead-Free Solders Under the Dynamic Stress

Advanced Science, Engineering and Medicine. 2015, 7(7), 296-299. ISSN 2164-6627.

- **Publikace ostatní**

Bušek, D.; Plaček, M.; Růžička, D.

Wetting balance test - Comparison of solder alloys wetting

In: 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE, 2017. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-5386-0582-0.

Dušek, K.; Plaček, M.; Čepěk, M.; Molhanec, M.; Beshajová Pelikánová, I.

Ultrasonic soldering, mechanical properties of solder joints

In: 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE, 2017. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-5386-0582-0.

Dušek, K.; Bušek, D.; Petráč, A.; Plaček, M.; Kozák, M.; Molhanec, M.; Beshajová Pelikánová, I.

Comparison of mechanical resistance of SnCu and SnBi of solder joints

In: 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE, 2017. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-5386-0582-0.

Bušek, D.; Dušek, K.; Plaček, M.; Urbánek, J.; Horník, J.; Holec, J.

Determination of BGA solder joint detachment cause - warpage effect

In: 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. pp. 306-309. ISBN 978-1-4799-8860-0.

Dušek, K.; Plaček, M.; Bušek, D.; Dvořáková, K.; Rudajevová, A.

Study of influence of thermal capacity and flux activity on the solderability

In: 37th Int. Spring Seminar on Electronics Technology. New York: IEEE, 2014. pp. 185-188. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-4799-4455-2.

Plaček, M.; Dušek, K.; Urbánek, J.

Whiskers Growth on Thick Tin Layers and Various Types of Surfaces

In: 37th Int. Spring Seminar on Electronics Technology. New York: IEEE, 2014. pp. 193-197. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-4799-4455-2.

Dušek, K.; Vodrážka, J.; Horák, M.; Brejcha, M.; Plaček, M.; Beshajová Pelikánová, I.; Papež, V.; Kudláček, I. et al.

Analýza parametrů součástek elektroměrů s ohledem na klimatické podmínky

[Research Report] 2013.

Marcinka, O.; Plaček, M.; Žák, P.; Konečná, Z.

Whiskers growth on lead-free solder under dynamic stress



In: Development of Materials Science in Research and Education. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015. pp. 38. ISBN 978-80-970896-5-8.

Žák, P.; Plaček, M.; Hrouda, P.

Diagnostics of Whiskers Using Expert System

In: Electric Power Engineering 2013. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2013. pp. 309-311. ISBN 978-80-248-2988-3.

Plaček, M.; Marcinka, O.; Žák, P.; Konečná, Z.

The Growth of Whiskers on Thick Layers of Lead-Free Solders

In: Development of Materials Science in Research and Education. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015. pp. 47. ISBN 978-80-970896-5-8.

Plaček, M.; Bušek, D.; Mach, P.

Influence of nanoparticle additives on change of the glass transition temperature of electrically conductive adhesives

In: Electric Power Engineering 2013. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2013. pp. 305-307. ISBN 978-80-248-2988-3.

Mach, P.; Plaček, M.; Bušek, D.; Kolář, J.

Diagnostic of Electrical Properties of Electrically Conductive Adhesives

In: Diagnostika 2013. Pilsen: University of West Bohemia, 2013. pp. 14-17. ISBN 978-80-261-0210-6.

Plaček, M.; Mach, P.

Monitoring of Metalized Film Capacitors Degradation with Impedance Nonlinearity Measurement

In: SIITME 2013. Bucharest: University of Bucharest Publishing House, 2013. pp. 263-266. ISBN 978-1-4799-1555-2.

Mach, P.; Plaček, M.

Influence of Filler Concentration on Frequency Dependence of Electrically Conductive Adhesive Joints Impedance

In: SIITME 2013. Bucharest: University of Bucharest Publishing House, 2013. pp. 79-82. ISBN 978-1-4799-1555-2.

Ohlasy

Dušek, K.; Bušek, D.; Plaček, M.; Geczy, A.; Krammer, O.; Illés, B.

Influence of vapor phase soldering fluid Galden on wetting forces (tombstone effect)

- Saxena, S.; Malik, P.; Tyagi, Ajay K.; Seshadri, G.; Mandal, U.

Stabilization of perfluoropolyethers (PFPEs) with acyl fluoride and carboxylic acid end-groups by UV-irradiation

RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY, vol. 156, pp. 44 - 49, 2019. ISSN 0969-806X.

Veselý, P.; Horynová, E.; Starý, J.; Bušek, D.; Dušek, K.; Zahradník, V.; Plaček, M.; Mach, P. et al.

Solder joint quality evaluation based on heating factor



- Otahal, A.; Szendiuch, I.
Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer
JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING-ELEKTROTECHNICKY CASOPIS, vol. 69, no. 4, pp. 305 - 310, 2018. ISSN 1335-3632.

- Bušek, D.; Dušek, K.; Růžička, D.; Plaček, M.; Mach, P.; Urbánek, J.; Starý, J.
Flux effect on void quantity and size in soldered joints

- Barbosa, F.; Teixeira, Jose C. F.; Teixeira, Senhorinha F. C. F.; Lima, Rui A. M. M.; Soares, Delfim F.; Pinho, Diana M. D.
Rheology of F620 solder paste and flux
SOLDERING & SURFACE MOUNT TECHNOLOGY, vol. 31, no. 2, pp. 125 - 132, 2019. ISSN 0954-0911.

- Huang, Y.; Luo, Y.; Xiao, F.; Liu, B.
Failure Mechanism of Die-Attach Solder Joints in IGBT Modules Under Pulse High-Current Power Cycling
IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS, vol. 7, no. 1, pp. 99 - 107, 2019. ISSN 2168-6777.

- Illes, B.; Geczy, A.; Krammer, O.; Skwarek, A.; Witek, K.
Soldering problems of large size SMD PET capacitors during vapour phase soldering process
2018 41ST INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2018. ISBN 978-3-319-73847-5. ISSN 2161-2536.

- Surendar, A.; Akhmetov, Linar G.; Ilyashenko, Lubov K.; Maseleno, A.; Samavatian, V.
Effect of Thermal Cycle Loadings on Mechanical Properties and Thermal Conductivity of a Porous Lead-Free Solder Joint
IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, vol. 8, no. 10, pp. 1769 - 1776, 2018. ISSN

- Okereke, Michael I.; Ling, Y.
A computational investigation of the effect of three-dimensional void morphology on the thermal resistance of solder thermal interface materials
APPLIED THERMAL ENGINEERING, vol. 142, pp. 346 - 360, 2018. ISSN 1359-4311.

- Ismail, N.; Ismail, R.; Jalar, A.; Omar, G.; Salleh, E.; Kamil, N.; Rahman, I.
Comparative study of interfacial interaction between aromatic and aliphatic functional group in solder wettability
JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS, vol. 29, no. 15, pp. 12910 - 12916, 2018. ISSN 0957-4522.

- Dziurdzia, B.; Sobolewski, M.; Mikolajek, J.
Convection vs vapour phase reflow in LED and BGA assembly
SOLDERING & SURFACE MOUNT TECHNOLOGY, vol. 30, no. 2, pp. 87 - 99, 2018. ISSN 0954-0911.

- Illes, B.; Geczy, A.; Skwarek, A.; Szwagierczak, D.; Witek, K.
Void Separation Efficiency of Vacuum VPS technology on FR4 and LTCC Substrates



2017 IEEE 23RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR DESIGN AND TECHNOLOGY IN ELECTRONIC PACKAGING (SIITME), pp. 68 - 72, 2017.

- Tan, A.; Tan, A.; Yusof, F.
Evolution of microstructure and mechanical properties of Cu/SAC305/Cu solder joints under the influence of low ultrasonic power
JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS, vol. 705, pp. 188 - 197, 2017. ISSN 0925-8388.
- Stuna, J.; Steiner, F.; Hirman, M.
Properties of temperature stable solder pastes
2016 6TH ELECTRONIC SYSTEM-INTEGRATION TECHNOLOGY CONFERENCE (ESTC), 2016.
- Liang, S.; Ke, C.; Zhou, M.; Zhang, X.
Phase field simulation of morphological evolution and migration of the microvoid in small scale solder interconnects driven by temperature gradient
2016 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC PACKAGING TECHNOLOGY (ICEPT), pp. 953 - 957, 2016.
- Tsai, T.-N.; Liukkonen, M.
Robust parameter design for the micro-BGA stencil printing process using a fuzzy logic-based Taguchi method
Applied Soft Computing, vol. 48, pp. 124 - 136, 2016. ISSN 1568-4946.

Bušek, D.; Dušek, K.; Plaček, M.; Urbánek, J.; Horník, J.; Holec, J.

Determination of BGA solder joint detachment cause - warpage effect

- Li, Y.; Hatch, O.; Liu, P.; Goyal, D.
Root Cause Investigation of Lead-Free Solder Joint Interfacial Failures After Multiple Reflows
JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS, vol. 46, no. 3, pp. 1674 - 1682, 2017. ISSN 0361-5235.
- Krammer, O.; Garami, T.; Nagy, A.
The Effect of Cooling Rate on the Thermo-mechanical Properties of Micro-alloyed Solders
2016 39TH INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), pp. 204 - 209, 2016. ISSN 2161-2536.

Dušek, K.; Plaček, M.; Bušek, D.; Dvořáková, K.; Rudajevová, A.

Study of influence of thermal capacity and flux activity on the solderability

- Garami, T.; Krammer, O.; Harsanyi, G.; Martinek, P.
Method for validating CT length measurement of cracks inside solder joints
SOLDERING & SURFACE MOUNT TECHNOLOGY, vol. 28, no. 1, pp. 13 - 17, 2016. ISSN 0954-0911.

